

28.5
Г68
1167928

Серия «Человек и окружающая среда»

А.М.Гордеев В.Б.Шешнев



ЭЛЕКТРИЧЕСТВО В ЖИЗНИ РАСТЕНИЙ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Серия «Человек и окружающая среда»

Основана в 1975 году

А. М. Гордеев В. Б. Шешнев

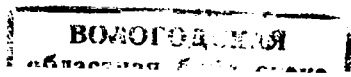
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО В ЖИЗНИ РАСТЕНИЙ



Москва «Наука»

1991

1167928



ББК 40.1
Г68
УДК 58.037

Ответственный редактор
академик ВАСХНИЛ В. С. Шевелуха

Рецензенты
доктор биологических наук О. А. Соколов,
член-корреспондент АН УССР В. В. Моргун

Редактор издательства Т. И. Белова

Гордеев А. М., Шешнев В. Б.
Г68 Электричество в жизни растений.— М.: Наука,
1991.— 160 с., ил.— (Человек и окружающая среда).
ISBN 5-02-004074-6

Фотосинтез, минеральное питание, многие другие процессы, протекающие в растениях, так или иначе связаны с существующим на Земле электрическим полем. Этот научный факт, к пониманию которого ученые шли несколько столетий, только в наши дни получает обобщающее объяснение. Вот почему именно в конце XX в. исследователи смогли дать толкование ряду загадок растительного мира — от того, как лучше управлять формированием урожая, чтобы не вступать в противоречие с истинными потребностями возделываемых сельскохозяйственных культур, до понимания того, почему на борту искусственных спутников нашей планеты не росли самые традиционные для земледельцев растения. Всем этим проблемам посвящена данная книга. Вместе с тем в ней обоснована разработка принципиально новых для сельского хозяйства технологий — электрических, которые, скорее всего, придут на смену ныне принятым химическим, представляющим опасность для биосферы и человека.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся сегодняшним состоянием биологии.

Г 1906000000—092.84—90 НПЛ
054(02)—91

ББК 40.1

ISBN 5-02-004074-6

© Издательство «Наука», 1991

Не будучи физиком, я всегда утверждал и доказывал, что физиология не что иное, как физика, примененная к биологии.

К. А. Тимирязев

Введение

Электричество и растения — что может быть общего у них? Электричество — совокупность явлений чисто физических, растение — объект биологический. Однако еще в середине XVIII в. естествоиспытатели поняли: эти два понятия объединяет какая-то внутренняя связь. И поразительно! — уже тогда, несмотря на полное отсутствие научного обеспечения, зародилась так называемая электрокультура — выращивание растений с помощью электрического воздействия. Правда, судьба этого своеобразного направления агрономии оказалась весьма переменчивой. Вокруг него то разгорались страсти, возникал ажиотаж, то электрокультуру обругивали и забывали на длительный период, то она вновь выходила на передний край научных поисков.

Причина чередований этих взлетов и падений — недостаток знаний. Ибо очень долго достоянием исследователей были лишь отдельные факты, свидетельствовавшие о том или ином конкретном действии электрических сил на рост растений. Сложить из них целостную картину, конечно, не удавалось. И только в последние десятилетия ученые стали проникать в суть биологического эффекта электричества, познавать механизм его участия в простейших и самых сложных физиологических процессах, протекающих в листьях, стеблях, корнях. Одновременно присошедший прорыв человечества в космос неизмеримо расширил наши познания об ионосфере, магнитосфере, о всей электрической системе Земли. Ведь именно в ней и под ее влиянием шла эволюция растительного организма.

Все это дало новый толчок развитию одной из ветвей биологической науки — электрофизиологии растений, а также практическому применению ее открытий. Причем дело не ограничивается заботами сугубо земными, например электростимуляцией различных сельскохозяйственных культур, способствующей повышению их урожайности. Нет, ныне электричество помогает растениям преодолевать неблагоприятные воздействия невесомости, что в наше время длительных орбитальных полетов стало немаловажной проблемой.

Таким образом, очень сложные взаимосвязи живых организмов с природными и индустриальными электромагнитными полями, развитие кибернетических представлений о возможной регулирующей роли внешних воздействий, потребность в развитии физических (в отличие от экологически небезопасных химических) способов повышения урожайности сельскохозяйственных культур в условиях современного уровня научно-технической революции вызывают необходимость более глубоких познаний электрического мира растений. Они особенно необходимы биологам, агрономам, биофизикам, физикам, инженерам, метеорологам и другим специалистам. Тем более что специальная литература по данной проблеме «рассеяна» по страницам сотен журналов, многие из которых хранятся лишь в крупных библиотеках. Поднятые в этой книге вопросы столь широки, столь тесно увязаны с самыми различными, иногда далеко отстоящими друг от друга отраслями современной науки, что обобщить их даже в научно-популярной форме очень трудно. И вполне понятно, что в некоторых разделах авторы не смогли учесть новейшие научные достижения, какие-то вопросы остались недостаточно освещенными с точки зрения представителей конкретных наук. Да мы и не стремились к полному охвату всех направлений поднимаемой проблемы. Главное — привлечь внимание к ней как можно больше профессионалов и просто любителей природы, всех, кому небезразличны удивительно разнообразные и высочайше организованные взаимодействия физических и биологических процессов в растительных организмах, кто озабочен поиском эффективных путей пополнения продовольственных ресурсов.

«Живое» электричество

Скажите мне, что такое электричество, и я объясню все остальное.

В. Томсон

Как это начиналось

В конце XIX в. в России была в ходу такая шутка. Экзаменатор, желая посмеяться над неподготовленным студентом, говорил: «Ну, уж раз вы, сударь, не могли ответить на все мои вопросы, разрешите задать вам самый простой: что такое электричество?» Студент отвечал: «Господин профессор, честное слово, знал, но забыл». После чего довольный экзаменатор восклицал: «Какая потеря для человечества — был один человек, который знал, что такое электричество, и тот забыл!»

Ну, а поскольку в каждой шутке есть доля правды, то и эта в определенной мере отражала состояние дел: тогда — всего-то около 100 лет назад! — еще не наступило время глубинного осознания существования, движения и взаимодействия заряженных частиц, хотя знакомство людей с ними началось очень давно. Чему свидетельство то, что термин «электричество» возник от греческого «электрон». Этим же словом жители Эллады некогда называли янтарь. И не случайно: натирая его, наши далекие предки обнаружили — он начинает притягивать к себе соломинки. Постепенно стали известны новые камни, которые также могли электризоваться, причем уже древние римляне считали их биологически активными. Гай Плиний Старший (23 или 24—79 гг. н. э.) в 37-томной «Естественной истории» предполагал, что орлы и аисты заносят в свои гнезда подобные камни потому, что они помогают их птенцам выжить и отпугивают змей.

Впрочем, много раньше, сами того не подозревая, люди столкнулись и с «живым» электричеством: уже на заре цивилизации им была известна способность некоторых рыб с помощью какой-то внутренней силы поражать добычу. Об этом свидетельствуют наскальные рисунки и начертания некоторых египетских иероглифов, изображающих электрического сома. И не его одного выделяли тогда по этому признаку. Аристотель (384—322 гг. до н. э.), например,

писал о средиземноморском скате *Torpedo*, заставляющем цепенеть животных, «пересиливая их силой удара, живущего у него в теле». Римские врачи умудрялись использовать «удары» скатов для лечения нервных болезней. С тех пор сомы, скаты, угри, другие рыбы, имеющие специализированные электрогенераторные органы, вошли в число излюбленных объектов исследований ученых. Сегодня известно около 300 видов таких организмов, некоторые из них создают внутри себя очень высокое напряжение — до 600 В.

Однако докопаться до причин «убойной мощи» подобных животных античные мыслители не смогли. Знаменитый возглас «Эврика!» в этом смысле мог бы слететь лишь с уст Л. Гальвани (1737—1798) — профессора Болонского университета в Италии.

Однажды он совершенно случайно положил препарированную лягушку на стол, где стояла электрическая машина. И тут один из его помощников острием скальпеля слегка коснулся ее бедренных нервов. Немедленно все мышцы конечностей начали интенсивно сокращаться. Повторение ситуации показали: такое явление отмечается в тот момент, когда из электрической машины извлекали искры.

Вскоре Гальвани обнаружил: сокращение лягушечьей лапки, соединенной с громоотводом, происходит и во время ударов молнии, и даже при появлении на небе грозовых облаков. Сокращались мышцы и при подвешивании препарированной лягушки на медном крючке к железному забору. Суммируя свои наблюдения, ученый пришел к выводу: дело не только в электричестве, подведенном извне (в том числе атмосферном), но и в прикосновении к конечности разнородных металлов, находящихся между собой в контакте. На основе последней группы фактов Гальвани решил, что открыл «животное» электричество, вырабатываемое в самом организме.

Впрочем, справедливости ради отметим: у первооткрывателя были достойные предшественники. Так, в 1751 г. М. Адансон (1727—1806) опубликовал в Париже книгу, в ней он отметил сходство между действием «ударов» электрических рыб и разрядов лейденской банки. Еще лет через двадцать было установлено: разряд электрического ската, как и конденсатора, передается по проводникам и изолятор его не пропускает. Да и сам великий Гальвани в конце концов сделал заключение: каждое мышечное волокно — подобие лейденской банки, заряженной электричеством.

Продолжая его эксперименты, А. Вольта (1745—1827) предположил, что по мышцам лягушки пробегает электри-

ческий флюид — модное тогда слово, которым обозначали почти все непонятные в то время физические явления. Словом, на рубеже XIX в. неясностей хватало. Но важнее другое. Исследования Гальвани и Вольты положили начало электрофизиологии как таковой, открыли эпоху электричества в физике и технике. Кстати, именно тогда Вольта выдвинул идею гальванического элемента: набор медных и цинковых кружочков, переложенных смоченным соленой водой сукном. Примечательно, что ни сам автор, ни его современники не имели ни малейшего представления о том, как и почему данный прибор работает. И ничего в том удивительного нет. Ведь тогда еще не существовало ни теорий об электрических явлениях, ни даже предпосылок к ним. Более того, царила уверенность: в природе есть пять форм электричества — обыкновенное (или электростатическое), получаемое трением янтаря, гребенки и т. д.; гальваническое (химическое), действующее на нервно-мышечные препараты, вызывающее нагревание проводников, разложение кислот, солей, щелочей и воздействующее на магнитную стрелку; термоэлектрическое, возникающее в участках проводников с разными температурами; магнитоэлектрическое, образующееся при пересечении магнитных полей замкнутыми проводниками; наконец, «животное» — биоэлектричество. Лишь знаменитый создатель учения об электромагнитном поле М. Фарадей (1791—1867) смог доказать единство всех видов электричества, чем сделал реальностью принятые ныне представления об этом физическом явлении.

Однако вернемся в XVIII в. После длительного застоя — все средневековье! — именно тогда началось бурное становление науки в Европе. В поле зрения оказались и проявления электрических сил. Еще задолго до Л. Гальвани англичанин С. Грей, потом француз Д. Нолле вооружаются электроскопом — самым первым в мире прибором, регистрирующим наличие электричества в том или ином объекте, — и поражаются: есть заряды в растениях!

Стоит ли их осуждать за то, что они удовлетворились констатацией факта?

Увлекался электричеством и известный естествоиспытатель, один из основоположников русской агрономии А. Т. Болотов (1738—1833). Электричество он рассматривал как особый вид материи, «частички» которой «непостижимой для нас мализны» двигаются с «непостижимой скоростью». В книге «Краткие и на опытности основанные замечания об электрицизме и о способности электрических махин к

помоганию от разных болезней» [Спб, 1803] Болотов называет множество болезней — от насморка до умопомешательства, поддающихся лечению электричеством.

Исследования электрической активности у представителей зеленого царства, по-видимому, начались в 1746 г. (Мэмбри в Эдинбурге). Чуть позже — в мае—октябре 1753 г.— М. В. Ломоносов издал работу «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих, предложенное от Михайла Ломоносова». В ней он так описывал свои опыты: «Третьего числа минувшего августа, чувствительную американскую траву на столе поставив, совокупил с электрическим прибором, когда солнце до западного касалось горизонта. Листы уже были сжаты, и от частого рук прикосновения опустились так, что чувства ни единого признака по многократном приложении перста не было видно. Но как машина приведена была в движение и электрическая сила стала действовать, ударяя в перст искрами, тогда листы хотя не отворились, однако от прикосновения руки много ниже опускались. Сей опыт многократным повторением не без приятного удивления уверил, что возбуждением электрической силы сенситива больше оживляется и что ее чувствование с оною некоторое сродство имеет»¹.

Вроде бы ясней ясного. Тем не менее на «добычу» первых бесспорных доказательств понадобилось еще сто с лишним лет. Их представил немецкий физиолог Э. Дюбуа-Реймон (1818—1896), которого по праву считают отцом электрофизиологии. И доводов к тому множество. Он создал стройное учение о природе и законах происхождения электричества в живых организмах; предположил, что электричество в тканях существует благодаря зарядам «электромоторных молекул», а определенная ориентация последних обуславливает направление постоянного тока, разработал ряд других положений. Работы Дюбуа и его школы, базирующиеся на применении физики в биологии, несомненно сказались и на развитии электрофизиологии растений.

Вели обстоятельные по тому времени электрофизиологические исследования с растениями и в России. В 60-е годы минувшего столетия Н. К. Леваковский наблюдал электрические токи в различных органах мимозы и других растений. Затем серию работ, в которых сопоставлялся характер электрических процессов, протекающих в растительной

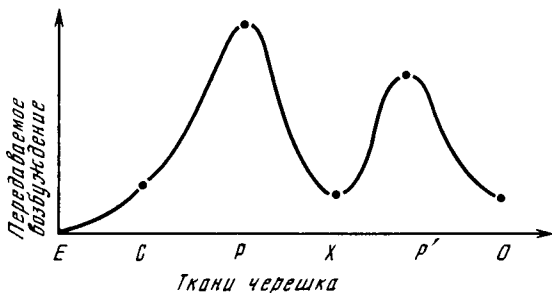
¹ Ломоносов. М. Избранная проза. М.: Сов. Россия, 1986. С. 458.

и животной тканях, выполнил Ранис. А в 1901 г. в Москве Т. И. Вяземский издал книгу «Электрические явления растений», изложив в ней результаты собственных опытов по изучению электрических параметров растений, в частности сопротивление листа в зависимости от силы и плотности тока.

Огромное значение электрическим явлениям придавал основоположник русской школы физиологов растений К. А. Тимирязев (1843—1920). Важнейшими факторами, влияющими на жизнедеятельность растений, он считал свет, теплоту, электричество. И хотя непосредственно электрическим явлениям в этой последовательности ученый отвел третье место, в реализации процесса фотосинтеза он считал их наиважнейшими, ибо свет имеет электромагнитную природу. Да и как иначе, если К. А. Тимирязев открыл фотосинтетическую активность красного цвета, обосновал его действие на хлорофилл с энергетической точки зрения, рассчитал амплитуду колебаний волн этой части спектра солнечного света и определил их интервалы в шкале электромагнитных волн П. Н. Лебедева.

Параллельно с Тимирязевым, за тысячи километров от него — в Калькутте — еще одним аспектом проблемы электричество и растение занимался индийский ученый Д. Ч. Бос (1858—1937). Прекрасный экспериментатор, он создал целый ряд приборов для постановки биофизических опытов, с помощью которых, в частности, исследовал свойства электромагнитных волн и их действие на растение. Он установил аналогию между реакцией на внешние раздражители у растений и животных и тем, что волна «разрушения», вызываемая ударами по стеблю или покачиванием дерева под напором ветра, распространяется вдоль растения и одновременно образуется сопутствующая волна радиального изменения электродвижущей силы (ЭДС). Мимо его внимания не прошел также тот факт, что при подаче довольно слабого постоянного тока процесс возбуждения в организме возникает не при его прохождении, а только в момент включения и выключения. Мало того, если включать ток постепенно, возбуждения может вообще не быть.

Для опытов Бос выбрал мимозу, которую называют «стыдливой невестой». Нет, не путайте ее с известной в СССР мимозой (акацией серебристой) с желтоватыми цветочками, растущей в Закавказье, чьи веточки продают у нас накануне женского дня 8 марта. Растение, привлекавшее Боса, вернее, его сочленовые подушечки, поддерживающие черешок зеленой «ладошки», устроены так, что даже при



Р и с. 1. Различная интенсивность передаваемого возбуждения в разных тканях мимозы

Е — эпидермис; С — кора; Р — наружная флоэма; Х — ксилема; Р' — внутренняя флоэма; О — сердцевина

слабом потряхивании или прикосновении черешок немедленно опускается вниз, а мелкие листочки сложного листа складываются. При более сильном воздействии схоже «поступают» и рядом расположенные листья, причем координация их движений — предел совершенства. Хотя способностью воспринимать раздражение в разной степени наделены почти все части листа, тем не менее есть особо чувствительные. Это так называемые осязательные волоски, расположенные в ряд поперек сокращающейся сочленовой подушечки. Достаточно легкого прикосновения к одному из них, и лист опускается. Основная цель таких манипуляций — спасение растения от травоядных животных, поскольку потревоженные листья прижимаются к колючему стеблю. Сигнал к действию, как определил Бос, передают им электрические импульсы. В разных тканях черешков мимозы они имеют неодинаковую интенсивность (рис. 1). Выходит, безошибочно решил ученый, своеобразным проводником для них служат трубчатые клетки флоэмы. По ним импульсы распространяются вверх в 3—3,5 раза быстрее, чем вниз, и влиять на них может внешнее (по отношению к растению) напряжение. При этом ток, следующий в том же направлении, что и передаваемый импульс, уменьшает интенсивность возбуждения или полностью блокирует его (для чего достаточно напряжения в 2 В). Наоборот, стоит постоянный ток направить против импульса, и сила последнего увеличивается.

К сожалению, многолетняя работа с мимозой не прошла для Боса бесследно. Он так увлекся этим растением, что буквально очеловечил его. И дело не в трогательной симпатии, с которой он говорил о своем постоянном объек-

те (его стебель, считал он, «похож на руку, а четыре расставленные подчерешка — на растопыренные пальцы»). Результатом чрезмерного восхищения ученого тончайшими механизмами возбудимости растительного организма стало убеждение: токи, возникающие в растительных и животных клетках, имеют глубокое физико-химическое единство. Это заблуждение выразилось даже в названии второго тома его избранных произведений — «Нервный механизм растений».

Конец минувшего и начало текущего столетий были отмечены массовым увлечением электричеством. Его искали во всех окружающих человека предметах, в самом человеке, им воздействовали на все, что попадалось под руки. При этом некоторые одаренные научной интуицией люди обнаруживали явления, необъяснимые и в наше время.

Весьма любопытны в этом отношении изобретения Я. О. Наркевича-Иодко. В конце прошлого века журнал «Сельский хозяин» сообщил: на полях его имения, расположенного недалеко от Минска, установлены градоотводы. И «прикрытые» ими посевы не гибли от града, не знали они и пожаров от молний. Он проводил опыты с атмосферным электричеством, лечил нервнобольных и ревматиков, воздействуя индукционными токами на определенные нервные узлы. Или вот примененный им способ передачи информации с помощью телефонных аппаратов, но без проводов, когда в качестве антенны использовались... комнатные цветы, ветки вербы. Русские и иностранные газеты сообщали, что Я. О. Наркевич-Иодко делает фотоснимки «с помощью искр и волнообразных колебаний». На них якобы хорошо просматривались различия между листьями растений, отличающихся уровнем физиологической активности.

Круг проблем, интересовавших исследователя, был весьма широк. Наибольшего успеха он достиг в исследовании воздействия электричества, в том числе и атмосферного, на растения, другие живые организмы. Его труды и доклады, как он писал сам в официальном отчете, проверяли и одобрили известные русские профессора: физик Н. Г. Егоров, химик Д. И. Менделеев, растениевод А. В. Советов, почвовед В. В. Докучаев и многие другие. В 1900 г. на Международном конгрессе Я. О. Наркевич-Иодко присваивают звание «профессора электрографии и магнетизма».

Судьба этого безусловно талантливого ученого была удивительной и в то же время загадочной. Вокруг его лич-

ности ходили разные толки, порожденные в основном таинственностью и необычностью его занятий. Представьте, что значило в те времена увидеть в темной лаборатории светящееся растение или окруженного ореолом человека! Один из исследователей деятельности Наркевича-Иодко минчанин В. Киселев пишет: «Кто он, гений или одаренный ученый-подвижник? Почему в последующие 30—40 лет никто не повторил полученные им в течение десятилетия экспериментальные результаты? Меня не оставляет мысль, что ученый достиг большего, чем нам об этом известно, но какие-то таинственные, а может быть и драматические обстоятельства воспрепятствовали глубоким обобщениям и широким публикациям» [Техника — молодежи. 1983. № 11. С. 46—53].

Действительно, далеко не все результаты экспериментов многих ученых того времени известны последующим поколениям. И причин тому немало. Во-первых, тогда далеко не все публиковалось. Во-вторых, много потеряно в тяжелые для России годы первой мировой, гражданской и Великой Отечественной войн. Не последнюю роль сыграло и то, что после очередного бума «животного» электричества на стыке веков в его развитии наступил новый длительный период затишья: одни исследователи считали такие занятия несостоятельными, другие не видели в них смысла. Но знания, добытые пионерами «животного» электричества, не пропали втуне — постепенно начала формироваться целая отрасль биологической науки — электробиология, привлекавшая к себе все новых и новых поклонников. Теперь в глубины биоэлектричества устремлены не ученые-одиночки, а крупные коллективы научно-исследовательских институтов и вузов. И с каждым днем все яснее становится исключительная роль электричества в жизни организмов, в том числе растительных.

У истоков жизни

«Отыщи всему начало, и ты многое поймешь», — гласит один из афоризмов Козьмы Пруткова. Следуя мудрому совету, давайте отправимся к истокам жизни. О ее происхождении на нашей планете существует довольно много теорий. Однако по существу все они предусматривают участие в этом акте электричества.

Так, из общепризнанной на сегодняшний день теории академика А. И. Опарина (1894—1980) следует: первичная

атмосфера планеты имела восстановительные свойства и на определенном этапе своего развития должна была содержать наряду с газообразным водородом и парами воды соединения углерода и азота с водородом. В такой атмосфере под влиянием молний и других форм электричества образовывались органические вещества, которые с течением времени могли приобретать свойства живого.

Эта теория получила многочисленные экспериментальные подтверждения. В середине нашего века в лабораторных условиях из смеси газов, предположительно составлявших первичную земную атмосферу, удалось синтезировать ряд аминокислот, некоторые компоненты нуклеиновых кислот и даже аденозинтрифосфорную кислоту (АТФ), пептиды, белковоподобные вещества, т. е. все то, что «складывает» живой организм. Причем органические соединения образовывались в результате воздействия тепловой энергии, ионизирующего и ультрафиолетового излучений, электрических разрядов. Все это на заре зарождения жизни было в изобилии на Земле. В те далекие времена атмосферу беспрестанно пронизывали электрические разряды и испускаемые Солнцем короткие электромагнитные волны (ультрафиолетовые), так как в воздухе не существовал кислород и, следовательно, не было озонового «щита» Земли.

Гипотезу электромагнитного происхождения и эволюции жизни на Земле недавно выдвинул академик ВАСХ-НИЛ Л. Г. Прищеп. Она не противоречит общей теории происхождения жизни, лишь конкретизирует ее, позволяя объяснить суть биоэлектрических явлений, в значительной мере раскрывая механизм воздействия электромагнитных полей на семена, растения, животных. Опираясь на эту гипотезу, можно успешнее искать пути управления биоэлектрическими параметрами растений.

В соответствии с идеей Л. Г. Прищеп единой первоосновой как для живой, так и неживой природы является принцип электромагнитной релаксации. Последнее слово, вероятно, известно не всем: в переводе с латинского оно означает ослабление, уменьшение. К рассматриваемому же случаю ближе подходит принцип действия релаксационного генератора, применяющегося в радиотехнике: конденсатор, заряжаясь от источника напряжения, через определенное время разряжается с излучением электромагнитных колебаний. В природе роль конденсаторов играют облака, а источником напряжения чаще всего служат заряды, возникающие вследствие трения приземных воздушных потоков.

Примерно такой механизм, запускаемый электрическими силами, миллионы лет назад и дал возможность комплексам органических молекул начать обмен веществ с окружающей средой. Как? Л. Г. Прищеп считает, что оболочки крупных скоплений молекул, носящих белковоподобный характер, были способны принимать заряд на свою внешнюю часть и обеспечивать противоположный (по знаку) своей внутренней поверхности заряд. Предположим теперь, что некоторые из таких молекул (по А. И. Опариной — коацерватные капли) нижним участком оказались прикрепленными к выступам скал, периодически омываемым морем. Здесь-то и началось самое интересное — зарождение жизни.

В момент погружения капли в воду наружная поверхность ее оболочки приобретала знак минус, внутренняя — плюс. Сразу же в соответствии с законами физики в ней возникали электростатические силы. Они расширяли каплю, втягивали в нее насыщенную ионами морскую воду — своего рода питательный бульон с соответствующими компонентами, несущими заряд. При «уходе» моря капля оказывалась под воздействием оседающих паров воды, имеющих положительный заряд. И ситуация менялась на обратную: теперь наружный слой оболочки становился положительно заряженным, внутренний — отрицательно. Под влиянием изменившихся направления электростатических сил капля сжималась и выбрасывала во внешнюю среду «отходы», т. е. частицы, потерявшие заряд при электрохимических взаимодействиях внутри ее. Цикл обмена веществ завершился. Именно так могли возникнуть предшественники современных автотрофных (самих себя питающих) организмов. Провокации разряда способствовали и кванты света, что могло положить начало фотосинтезу (сначала он возник у примитивных синезеленых водорослей).

В дальнейшем процесс электромагнитной релаксации капель, повторявшийся достаточно долгое время, достигал автоматизма. Таким образом формировались дееспособные образования, которые требовали все меньше и меньше внешнего воздействия для своего периодического сокращения и расширения. Эволюционно эта релаксация передавалась и многим простейшим, существующим в природе и по сегодняшний день. Например, у инфузории пульсируют выделительные вакуоли — аппараты, принимающие участие в обмене веществ.

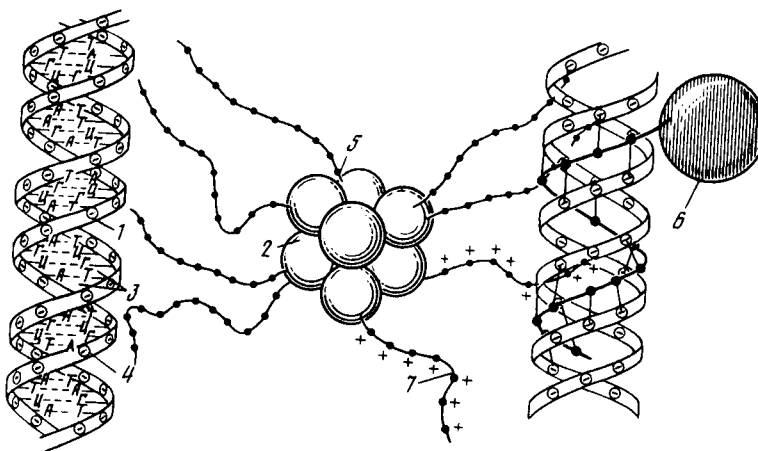
Жизнь невозможна без электричества

В период расцвета натурфилософии Шеллинга малоизвестный тогда немецкий естествоиспытатель Л. Окен (1779—1851) издал «Учебник натурфилософии» (1809 г.). В одном из его параграфов он провозгласил: «Принцип жизни есть гальванизм. Не существует никакой другой жизненной силы, кроме гальванической полярности...» Если учесть, что гальванизм в те времена означал электричество, то приходится восхищаться удивительным научно-философским пророчеством ученого. Восхищаться тем сильнее, что в то время сущность биоэлектрических явлений, понимание их роли в жизненных процессах, были тайной за семью печатями, а скажем, ботаники еще не dospорили, разделены ли соседние клетки растения общей перегородкой или каждая имеет собственную оболочку.

Наиболее ярко роль электрических сил проявляется в функционировании белков. В определенном смысле белки именно им обязаны своей уникальной организацией, сочетающейся с необыкновенной гибкостью и пластичностью. Об этом, пожалуй, следует рассказать подробнее.

Белки, а их бесчисленное множество, строятся всего лишь из 20 аминокислот. Последние несут положительные или отрицательные заряды. Благодаря этому по программе, закодированной в носителе генетической информации — дезоксирибонуклеиновой кислоте (ДНК), они избирательно и организованно строят крупную молекулу белка с заданными структурой и свойствами. Да и сами белки, взаимодействуя между собой, возводят сложнейшие комплексы, каждый из которых играет строго определенную роль в организме. Причем малейшее отклонение от программы может резко изменить функциональные возможности комплекса, что сулит крупные неприятности особи в целом. Но этого практически никогда не бывает, если, конечно, не вклиниваются какие-либо серьезные внешние силы.

В том, что химические связи белков имеют электрическую природу, может убедиться каждый, например, при варке куриных яиц. Если яйцо варить в соленой воде, то трещина в скорлупе не ведет к вытеканию белка, так как он мгновенно сворачивается. Дело в том, что при растворении в воде солей и других веществ образуются заряженные частицы — ионы. Скапливаясь вокруг молекулы белка, они разрывают ее электрические связи, в итоге чего белок свертывается.



Р и с. 2. Электрическое строение ДНК

1 — двойная спираль ДНК; 2 — шаровые участки молекул; 3 — пары оснований; 4 — фосфатные группы (отрицательно заряжены); 5 — группа из восьми молекул гистонов; 6 — шаровой участок молекулы гистона; 7 — нитевидные участки молекул («хвосты»)

Заглянем теперь в святая святых живого организма — его наследственный аппарат, хранящийся в структурных элементах ядра клетки — хромосомах. Основу последних составляет вещество хроматин — это комплекс белков-нуклеопротеидов (гистонов) ДНК, кислых белков и рибонуклеиновой кислоты (РНК). Если «размотать» всю ДНК, то можно получить нить длиной 1—2 м, хотя в «запакованном» виде она занимает объем всего около 50 кубических микрометров. При этом хромосомы могут быть в 1000 раз короче нити ДНК, которая заложена в них.

Ученые долго не понимали, каким же образом ДНК укладывается так компактно и строго упорядоченно, как она «умудряется» выполнять сложнейшие, присущие только ей функции? Ответ пришел не скоро, спустя почти столетие после открытия хромосом. Выяснилось, что столь изумительная конструкция обеспечивается электрическими силами. Отрицательные заряды несут находящиеся на поверхности спирали ДНК фосфатные группы, а положительные — входящие в хроматин белковые молекулы гистонов. При этом один конец цепочки гистонов сворачивается клубком, а другой, заряженный, остается висеть «хвостом» с наружной стороны (рис. 2). Эти образования и укладыва-

ют ДНК в спираль за счет электрического притяжения к отрицательно заряженным фосфатам.

Такое электрическое строение ДНК и позволяет осуществлять генную инженерию. Воздействуя ферментом, а он имеет более мощный электрический заряд, «разрезают» ДНК на части или «вырезают» какой-то ее участок, отвечающий, допустим, за размер зерна, заменяя его другим, более полезным. Ныне высказывается предположение, что манипуляции генной инженерии удастся производить непосредственно внешними электромагнитными волнами, используя, к примеру лазер.

И еще об одной важнейшей особенности живых организмов. Всем хорошо известно: ни один из них не может существовать без воды. Благодаря ее изумительному свойству — растягивать молекулы на ионы — в клетках и межклеточном пространстве растений постоянно находятся вещества со свободными зарядами. Причем наряду с ионами калия, кальция, других химических элементов в растворе «странствуют» сложные органические молекулы. Многие из них буквально «начинены» электронами и представляют собой скопления, напоминающие гигантские атомы.

Физики предполагают, что в биологической системе подобные «суператомы» ведут себя довольно устойчиво и независимо, не вступают в реакцию с чем попало. От нежелательных контактов их предохраняют сверхпроводящие электронные оболочки, создающие контактные зоны или специфические центры. Электрические заряды последних имеют определенную величину и размещены в определенном порядке, благодаря чему они служат не только соединяющим механизмом, но и шифром, позволяющим белковой молекуле «узнавать» своего «запрограммированного» партнера среди множества других. Более того. Электростатические силы крупных молекул взаимодействуют даже на относительно далеком расстоянии. Это, вероятно, позволяет «зондировать» окружающую среду, распознавать нужного партнера, ориентированно стремиться к нему. Ну, а коль все обстоит так, то приходится вновь восхищаться изобретательностью природы. В данном случае она нашла удивительное решение: органические вещества клеточной плазмы в любое время готовы к соединению (несут электрический заряд), но лишь с конкретным «адресатом», ибо каждому из них вследствие «запрограммированности» структуры свойственно вполне определенное электрическое поле.

Не случайно, наверное, уже при зарождении растительный организм приобретает стойкие электрические свойства. Оплодотворенная зигота, например, водоросли уже через 30 мин становится электрополярной. Сейчас установлено, что более 90 % живого вещества состоит из полярных молекул белков, нуклеиновых кислот, углеводов и воды. Выходит, его основной молекулярный массив — это связанные электрические заряды (диполи). При этом полярные группы белковых молекул представляют собой карбоксильные (СНО), карбонильные (СО), амино- (NH₂), имино- (NH) и амидо- (CONH₂) группы, а ионизируемые группы — участки аминокислот (NH⁺, COO⁻). Значительный вклад в создание полярных зон в макромолекулах белков и нуклеиновых кислот вносят водородные связи.

Теперь представьте, что станет с живыми существами, если вдруг исчезнут электрические силы. В этом гипотетическом варианте все их составные части из безупречно организованного «механизма» превратятся в хаос — и жизнь кончится.

В целом растительную клетку можно представить в виде динамичной системы, состоящей из постоянно взаимодействующих органических и минеральных частиц, имеющих электрические заряды. Причем вся электрическая система ее существует лишь в связи с внешней средой, связи, кстати, избирательной, обеспечивающей нормальное протекание жизненных процессов. Роль организующего, регулирующего защитного механизма таких связей выполняет клеточная мембрана — уникальное порождение природы. Она заслуживает более подробного рассказа о себе, чему и посвящена следующая глава.

Воспоем электричество тела

У природы учиться спешим,
У цветка и земного рассвета...
А. Мишин

«Демон» Максвелла

Однажды великий физик Д. К. Максвелл (1831—1879) предложил поставить мысленный эксперимент. Вообразите, говорил он, трубку, заполненную разреженным газом. Посредине она разделена перегородкой с заслонкой. Допустим, что у последней имеется некоторое существо или устройство, различающее молекулы по скоростям. Этот «де-

мон» открывает заслонку перед быстрыми молекулами и закрывает перед медленными, т. е. сортирует их по энергии. В результате же первые соберутся в одной половине трубки, вторые — в другой. В итоге один конец устройства разогреется, другой охладится. Общая энергия устройства останется прежней, значит, первое начало термодинамики (закон сохранения энергии) мы не нарушим. Но система перешла от более вероятного состояния к менее вероятному. «Демон» получил разность температур, позволяющую совершить работу, — в обход второго начала термодинамики! Скажем, горячую половину трубки можно будет использовать как котел, холодную — как холодильник или конденсатор. Еще вариант: присоединить к ним концы термомпары и таким образом получать электрический ток.

Можно допустить даже и то, что на перемещение придуманной Максвеллом заслонки энергия не расходуется. Но как наш привратник определит, какую молекулу надо пропустить, а какую нет? Для этого, очевидно, он должен знать их скорость, непрерывно получать информацию об их координатах в каждый момент времени. А информация даром не дается. Подсчитано: затраты энергии на идентификацию молекул с лихвой перекроют возможный ее прирост. Как тут не вспомнить шутовское замечание: первое начало термодинамики утверждает, что в игре с природой нельзя выиграть, а второе — что нельзя даже остаться при своих.

Стало быть, рассортировать молекулы без больших затрат энергии невозможно? Положительный ответ на вопрос дают лишь живые организмы. Роль максвелловского «демона» в них играет мембрана — чрезвычайно тонкая (толщиной меньше стотысячной доли миллиметра) структура, расположенная на поверхности протоплазмы клеток и заключенных в ней частиц (ядра, митохондрий и др.). К тому же она помогает клетке с предельной рациональностью использовать имеющиеся у нее энергетические ресурсы. Чтобы понять, как все это становится возможным, нужно вначале разобраться с устройством мембраны и ее электрическими свойствами.

Любая растительная клетка отделена от окружающей среды двумя оболочками. Внешняя — клеточная стенка — состоит из целлюлозы, гемицеллюлозы, но в основном из длинных, довольно грубых и нерастворимых в воде полимерных молекул пектина, всегда заряженных отрицательно. Важной особенностью этой оболочки является то, что промежутки между цепями молекул пектина и целлюлозы

довольно велики. Хотя под микроскопом клеточная стенка выглядит плотным барьером, однако большая часть растворенных веществ и все неорганические ионы «воспринимают» ее как огромную, очень рыхлую сеть.

Вплотную к наружной оболочке примыкает внутренняя (плазмалемма), окружающая цитоплазму (полужидкая слизистая бесцветная масса сложного физико-химического строения). В последней плавают многочисленные твердые клеточные структурные компоненты — органеллы. Каждая из них окружена собственной мембраной, т. е. имеет персональное ограждение. Вследствие этого цитоплазма состоит как бы из отсеков, которые различаются концентрацией ионов. Наибольший объем клетки занимают вакуоли — своеобразные полости, заполненные в основном смесью водных растворов минеральных солей, а также некоторыми органическими веществами. Однако сейчас нам важнее другое — резервуар обязательно замкнут в свою мембрану. Наконец, как правило, в центре клетки расположено ядро со своей двойной мембраной, которую часто называют ядерной оболочкой.

Так что мембран в клетке достаточно много. И любая из них, сохраняя общие черты, в то же время обладает определенной избирательной проницаемостью, иными специфическими свойствами, обеспечивает четкое выполнение своих функций. Она пропускает через себя те и только те вещества, в том количестве и с той скоростью, на которые именно она запрограммирована. Задача кажется невообразимо трудной, но мембрана успешно с ней справляется. Калий, например, присутствует в цитоплазме в значительно более высокой концентрации, нежели в наружном межклеточном растворе, а достаточно родственный ему элемент натрий у большинства растений, наоборот, практически «выталкивается» за пределы клетки.

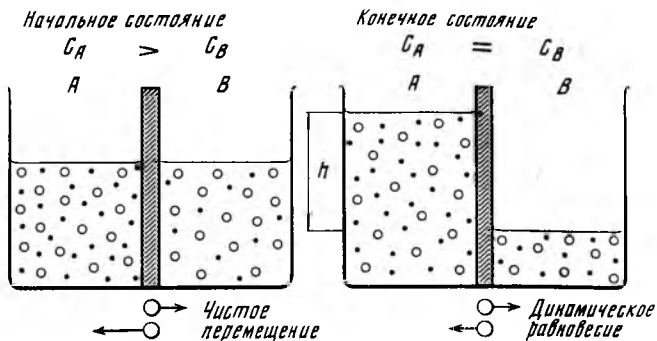
Устроены мембраны чрезвычайно сложно. С успехами по их изучению связаны многие последние достижения биологии. Это подтверждает хотя бы то, что вот уже в течение нескольких десятилетий большинство Нобелевских премий, в частности по медицине, было присуждено за исследования, в которых данные структуры играли далеко не последнюю роль.

Тонкими физико-химическими методами установлено: в состав мембран входят белки, липиды, вода, ионы калия, натрия, кальция, АТФ, отдельные ферменты, полисахариды и другие вещества, обычно находящиеся в клетке. Однако главные строительные элементы мембраны — белки

и липиды, причем расположены они в основном слоями, образуя нечто вроде многослойного «пирога». Кстати, и своим появлением на свет биомембраны обязаны именно липидам — эти жироподобные вещества в силу присущей им гидрофобности (неспособности растворяться в воде и даже смачиваться ею) могут на водной поверхности образовывать слой толщиной всего лишь в одну молекулу. Однако слой этот довольно прочный. Для доказательства — по аналогии — вспомните детские забавы с мыльными пузырями. Их стенки тоже мономолекулярны, тем не менее неплохо держатся, медленно сохнут. Наивное сравнение? Как сказать: когда-то знаменитый химик Р. Бойль (1627—1691), наблюдая за мыльными пузырями, высказал идею исследования изменения цвета тонких пластинок — одну из серьезнейших проблем теории цвета.

Но вернемся к биомембранам. Справедливости ради отметим: они «замешаны» не на чистых липидах, а на их модификации — фосфолипидах, большой конец молекул которых сложен из жирных кислот и представляет собой «хвост», меньший — из холина, серина и им подобных веществ, обладающих полярными зарядами, по форме напоминает «головку». В отличие от первой вторая группа органических соединений «любит» воду и не стремится уходить от нее в сторону. У фосфолипидов, несущих как положительные, так и отрицательные заряды на различных участках полярных «головок», дополнительным фактором, ориентирующим молекулы в водной среде, является электростатическое взаимодействие. Все это обуславливает уникальные свойства фосфолипидов: из всех природных липидов только они могут образовывать протяженные бислоиные структуры. В водном растворе их молекулы самопроизвольно собираются вместе так, что гидрофобные цепи жирных кислот закрыты от воды, а полярные группы выставляют в нее свои «головки». В итоге получается слой толщиной уже не в одну, а в две молекулы. При достаточной протяженности он стремится замкнуться сам на себе (в кольцо), чтобы надежнее спрятать от воды гидрофобные участки. В этом случае образуются везикулы — своеобразные «мыльные пузырьки».

Фосфолипиды иногда придают мембранам и мозаичное строение. Это происходит тогда, когда в силу каких-то причин «отрезаются» цепи жирных кислот и остаются лишь полярные «головки» с короткими «хвостиками». Такие дефектные молекулы, собираясь вместе, складываются не обычный бислой, а сферические образования — мицел-



Р и с. 3. Движение молекул воды через полупроницаемую мембрану, разделяющую две камеры, первоначально заполненные раствором вещества (черные кружочки) в разной концентрации [по: Кларксон Д. Транспорт ионов и структура растительной клетки. М.: Мир, 1978. С. 13]

C — концентрация растворенного вещества

лы. Входя в состав мембран, они формируют поры, внутренняя часть которых состоит из заряженных «головок».

Кроме того, биомембрана насыщена многочисленными белковыми веществами. Предполагается, что одни из них непрочны прикреплены к ее наружной поверхности, тогда как остальные пронизывают всю толщу. Поскольку и те и другие имеют заряды, то и они принимают активное участие в выполнении электрических функций мембраны. Например, поверхностные белки могут изменить характер распределения зарядов на наружной стороне мембраны и тем самым сообщить ей определенную избирательность в поглощении ионов. Некоторые специализированные белки формируют так называемые ионные каналы, по которым в клетку поступают элементы питания. Они обладают очень высокой избирательностью, т. е. пропускают только узкий «круг» вполне определенных ионов. И делается это не без участия электрических сил. Субмикроскопическое строение биомембраны обуславливает еще одно очень важное функциональное свойство: образование и удержание на определенном уровне разности электрических потенциалов между внешней и внутренней сторонами. Это уже дополнительная энергия, которая реализуется в клеточном метаболизме, о чем будет рассказано чуть позднее.

Многие, наверное, представляют мембрану как нечто жесткое, прочное и стабильное — ведь она же «стенка»! До недавних пор так считали и ученые. Но последние исследования свидетельствуют о другом. Оказывается, эта

структура, по крайней мере ее жирнокислотный компонент, имеет жидкостную основу. И природа тут не ошиблась: в такой среде успешнее идут различные реакции, в том числе и связанные с обновлением самой мембраны.

Жидкостное строение липидных прослоек мембраны определяет и многие другие ее качества. Во-первых, благодаря этому степень вязкости зависит от числа заряженных групп молекул и, значит, изменение плотности заряда влияет на диффузную проницаемость мембраны. Во-вторых, в жидком липидном слое находятся многочисленные очень подвижные молекулы и ионы. Они легко перестраиваются в определенном порядке, меняют сопротивление мембраны или генерируемые ею разности потенциалов, внося тем самым свой вклад в электрическую систему клетки.

Именно устройство мембраны — по существу, это самый сложный электронный прибор — обеспечивает безупречное выполнение ею той роли, которую она играет в создании живой клетки, обеспечении ее энергией, питанием, необходимыми связями с внешней средой.

Биологическая мембрана характеризуется целым рядом электрических показателей. Если учесть, что внутренний ее жирнокислотный слой представляет собой диэлектрик, а расположенные по обе стороны от него полярные «головы» фосфолипидных молекул имеют электрический заряд, то сразу возникнет желание сравнить эту структуру с конденсатором. По существу, так оно и есть. Биофизики определили и емкость мембраны — она находится в пределах 1 мкФ/см^2 , а ее диэлектрическая проницаемость колеблется от 2 до 13 единиц.

Тем не менее через мембрану ток течет, так как через нее постоянно «просачиваются» ионы. Однако сила его очень мала, и поэтому многие склонны принимать его за результат утечки конденсатора. Правда, стоит приложить внешнее постоянное электрическое напряжение, и ток усиливается, но со временем опять ослабевает, ибо мембрана сильно поляризуется. Это основная причина того, что весьма велико электрическое сопротивление рассматриваемых структур — от 10^2 до 10^5 Ом/см^2 . Это примерно в 10 000 раз выше, чем у сходных по строению искусственных структур, что еще раз свидетельствует: мы слишком далеки от их воспроизводства.

Это лишь самая малая толика того, что известно об устройстве биологических мембран, а сколько еще неизвестно? Кого интересует этот вопрос, тот может прочитать вышедшую у нас в стране книгу Ясуо Кагава «Биомембраны»

[М.: Высш. шк., 1985]. А мы будем продолжать повествование о «живом» электричестве, выполняющем не только энергетические, но и регуляторные функции. Оно как раз зарождается в мембране. Чтобы понять, как это происходит, надо совершить небольшой экскурс в электрохимию.

Электрохимический двигатель клетки

Вспомним: если в левой части сосуда количество растворенного вещества в единице объема больше, чем в правой, то его частицы передвигаются вправо до тех пор пока не выравняется их концентрация (рис. 3). Этот тип передвижения веществ, движущей силой которого является концентрационный градиент, или градиент химического потенциала, называется диффузией. Применительно к растительной клетке такое передвижение (в научной литературе его называют транспортом) считается пассивным.

«Питается» растение не целыми молекулами того или иного вещества, а их частями, несущими на себе положительный или отрицательный заряд, — ионами. Однако последние в почвенных растворах практически всегда окружены прочно удерживаемыми оболочками из молекул воды. Они ограничивают свободу перемещения ионов даже в электрическом поле. И им не проникнуть через поры мембран, пока не будут разорваны водородные связи. Для чего требуется дополнительная энергия, способная перебрасывать необходимые для внутриклеточного производства элементы питания.

Такую энергию дает электрохимический потенциал. Он не стабильный показатель, как, например, электрический заряд, а результат взаимодействия электрического и химического потенциалов. Если первый из них выражает работу, которую должен проделать ион для преодоления электрических сил, то второй отражает его активность в растворе.

Поскольку клеточное содержимое по отношению к наружному раствору заряжено отрицательно, ионы последнего, несущие положительный заряд, переходят в клетку вопреки своим химическим «обязанностям». И чем больше разность электрических потенциалов на мембране, тем сильнее выражена данная тенденция. В конце концов она может оказаться достаточно сильной и действие химического потенциала, или, как говорят, градиента концентрации, будет нейтрализовано. При этом ионы из разбавленного наружного раствора «переберутся» в концентрирован-

ный клеточный сок и проделают это, что весьма интересно, без увеличения свободной энергии.

Исследователи научились довольно точно подсчитывать разность электрических потенциалов химических элементов, необходимую для уравнивания градиента концентрации. Например, чтобы уравновесить разность концентрации 1:100 одновалентного катиона, необходима разность электрических потенциалов 116 мВ. Такая величина вполне обычна для самых разных растительных клеток. Для ее формирования они используют ионы распространенных на Земле элементов калия, натрия, водорода, хлора, некоторых других. Они исключительно точно, в необходимое время и в требуемых количествах с учетом запросов клетки перебрасываются с одной стороны мембраны на другую и обратно, совершая жизненно важную для растения работу. Как же это происходит?

В клетке непрерывно синтезируются белки, большинство из которых несут отрицательный суммарный заряд. Так как их молекулы слишком велики, чтобы свободно проходить сквозь мембрану, то внутри клетки постоянно существует отрицательный заряд. Снаружи ее в растворе всегда имеются ионы калия (K^+) и хлора (Cl^-). Причем последние легко проникают через мембрану путем обычной диффузии и, значит, повышают в клетке величину отрицательного заряда. Одновременно на наружной стороне мембраны, естественно, увеличивается сумма положительного заряда. Однако из-за электростатического притяжения вслед за хлором внутрь клетки устремляются и ионы калия, имеющие положительный заряд. Стало быть, их концентрация на внешней поверхности мембраны уменьшается. И, словно опомнившись от непродуманного поступка, они тут же устремляются назад. Опять возникает разность потенциалов и вслед за калием обратно начинают переходить ионы хлора. За ними должны бы следовать и белки, да они не могут этого сделать в силу непроницаемости для них мембраны, поэтому они остаются внутри клетки. Следовательно, процесс перекачки ионов повторится снова. И так до бесконечности. В итоге по обе стороны мембраны постоянно будет существовать несбалансированность подвижных ионов, что вызывает появление электрического потенциала.

В состоянии метаболического равновесия, когда клетка не растет, асимметричное распределение ионов образует усредненную разность потенциалов примерно в -12 мВ. Такая постоянная разность потенциалов, поддерживаемая

динамичным равновесием ионов внутри и снаружи клетки, называется потенциалом покоя. Однако такое случается редко — абсолютно спокойной жизни у растений, как и у человека, не бывает. В основном эта величина в растениях значительно больше и то и дело меняется в зависимости от метаболической энергии и внешних факторов. При этом начинают проявлять себя потенциалы действия. О них мы еще расскажем, когда речь пойдет об электросигнализации в растениях.

Нарисованные картины могут дать превратное представление о массовом переходе всех находящихся у мембраны ионов с одной стороны на другую. Расчеты показывают, что несбалансированность зарядов здесь ничтожна. И поэтому в перебросках участвует примерно миллионная доля находящихся в данном месте ионов. Однако и это — величайшее достижение живой клетки. Ведь за сбалансированностью зарядов строго «следят» физические законы, которые никому и ничему не позволяют вводить дисбаланс.

Еще две «профессии» мембраны

В действительности транспорт ионов через мембрану организован гораздо сложнее, нежели описано выше. В живой клетке на него влияют метаболические процессы, скорость прохождения ионов через мембрану (а ее определяют их радиус, активность, заряд), условия произрастания растений, состав питательных элементов.

Ученые все чаще находят подтверждение тому, что транспорт элементов питания через мембрану осуществляется не только благодаря своеобразному электрохимическому потенциалу. Существуют и другие, не менее изощренные способы. Так, в процесс включаются специализированные молекулы — переносчики. Они «узнают» определенное соединение и доставляют его сквозь мембрану. Оставив свой «груз» внутри клетки, эти молекулы возвращаются обратно для принятия нового груза. Причем их «хождение» туда-сюда вовсе не обязательно связано с разностью концентраций или потенциалов. Мало того, переносчики могут осуществлять операцию против градиента концентрации. Таковы законы живой клетки.

Для отдельных веществ в мембране формируются специальные каналы из тех липидных везикул, о которых сказано ранее. По своим функциям они напоминают ворота. Но не следует понимать, что канал пустой или запол-

нен водой — в него встроена молекула белка длиной от одной стороны мембраны до другой. Такие молекулы несут на себе положительные и отрицательные заряды. Поэтому как только из клетки подается электрический сигнал, «ворота» открываются и без задержки пропускают специфические ионы, требующиеся в данный момент клетке. Высокочувствительная измерительная аппаратура позволила установить, что в самой мембране при открывании или закрытии «ворот» происходит очень слабое, но достоверное смещение зарядов. Свойства и биологическую значимость этого явления еще предстоит изучить.

Однако определяющее значение для функционирования мембранного переноса ионов имеет метаболизм живого организма. Например, у водорослей соединения, подавляющие обмен веществ, вызывают почти мгновенную деполяризацию мембраны: ее потенциал падает с -170 до -80 мВ. И сразу же следует резкий сбой в работе транспортного механизма. В последнее время появилось много доказательств того, что за мембранным транспортом осуществляется и строгий генетический контроль. Регулятором выступают также ионы кальция (Ca^{2+}). В результате воздействия на ионы калия они в известной мере предотвращают утечку их из цитоплазмы в наружный раствор. Свообразна роль анионов (нитрат-, сульфат- и фосфат-ионов), которые имеют огромное значение для физиологии клетки. Как правило, через мембрану они проникают с помощью ферментов, и в клетке быстро включаются в процессы синтеза.

И все-таки, подметит пытливый читатель, здесь что-то не так. Ясно, что создаваемая на мембране разность потенциалов дает энергию для транспорта веществ. Но каким бы хитроумным не был наш вариант «демона» Максвелла, откуда он-то берет энергию для перераспределения ионов?

А тайны никакой нет. Зачастую — из богатой энергетическими связями аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ); она вырабатывается в процессе фотосинтеза за счет использования энергии солнечного света или в процессе дыхания растений за счет химической энергии. Но живой организм остается неизменно верным своему главному принципу — экономно расходовать энергию. А раз дело обстоит так, то почему бы мембране самой не наладить производство АТФ? Тем более что часть энергии как бы пропадает при возвращении ионов через нее в исходное состояние. Сказано — сделано: и вот при их транспорте

против электрохимического градиента (на это уходит много энергии) АТФ расщепляется с выделением энергии, когда же ионы движутся в обратном направлении, т. е. по электрохимическому градиенту, свободная энергия идет на синтез той же кислоты.

Однако исследователи не раз приходили к заключению: запасенной в АТФ энергии явно недостаточно для мембранных энергетических процессов. Так, в бактериальной клетке через мембрану переносится K^+ в 20—100 раз больше, чем то может обеспечить имеющееся количество АТФ.

Тридцать лет назад английский биохимик П. Митчелл высказал предположение, что для получения энергии на мембране совершенно не обязательно участие АТФ (эта гипотеза затем была доказана, а ее автор в 1978 г. получил Нобелевскую премию). Суть гипотезы Митчелла заключалась в том, что окисление пищи приводит к возникновению разности потенциалов за счет выхода из митохондрии ионов водорода. И только потом полученная энергия тратится на синтез АТФ. Таким образом был открыт протонный насос, заряжающий мембрану митохондрий.

Весьма оригинальными экспериментами, до каких не мог додуматься сам Митчелл, гипотезу подтвердили наши ученые под руководством члена-корреспондента АН СССР В. П. Скулачева. Ими найден резервный источник энергии, которая первично образуется в электрической форме. Оказалось: для запуска вырабатывающего ее генератора достаточно очень небольших энергетических ресурсов, чтобы зарядить электрическую емкость мембраны, после чего процесс идет довольно долго и устойчиво без участия АТФ. «Толкающая» сила — протонный потенциал, который возникает из-за разности концентрации данных ионов, находящихся по обе стороны мембраны, а в роли средства доставки выступают специфические белки (они-то и являются генераторами тока), встроенные в мембрану.

Следовательно, живая клетка располагает двумя «валютами» для «оплаты» своих энергетических потребностей — химической (АТФ) и электрохимической (протонный потенциал). Именно эту мысль в 1975 г. высказал В. П. Скулачев и спустя два года его поддержал П. Митчелл.

Затем было установлено, что независимый от АТФ мембранный потенциал за счет протонного насоса возникает не только при окислении пищи, но и под действием света в хлоропластах. И, как часто бывает в науке, вслед за первыми открытиями хлынул целый поток сообщений о

протонном насосе, который находили все в новых и новых клетках самых различных организмов.

Очень важными для разработки теории минерального питания растений оказались работы по мембранному транспорту доктора М. Питмана из Сиднея. Он показал, что ионы водорода могут выводиться из клетки не белковыми переносчиками, а путем взаимодействия пассивных и активных ионных потоков. При этом H^+ выводятся из клетки, и в обмен на них могут поглощаться катионы внешнего раствора, например $Na^+ - K^+$. Ионы водорода могут обмениваться и на ионы кальция, находящиеся в примембранном пространстве. Вследствие этого концентрация H^+ в непосредственной близости от мембраны повышается, что может увеличивать мембранную проницаемость. Эти выводы имели весьма интересные последствия.

Обнаружено, что в этом случае протонный насос оказывает решающее влияние на транспорт элементов питания через корневые клетки растений. Так, при увеличении внешней концентрации ионов происходит значительное падение мембранного электропотенциала, начинающееся при той же концентрации, при которой увеличивается выход протонов. Познание этих физических явлений позволило уяснить многие непонятные ранее вопросы корневого питания растений. Механизм обмена H^+ — катион важен также для регулирования баланса зарядов и контроля реакции среды в цитоплазме. Теперь становится ясным, что транспорт H^+ через мембраны — процесс, распространенный в природе довольно широко, если вообще он не является преобладающим для создания электрических потенциалов в клетках бактерий, грибов и растений. Градиент электропотенциала, создаваемый протонным насосом, способен приводить в движение потоки ионов как положительного, так и отрицательного зарядов.

Важное значение имеет поверхностный заряд биомембран, обусловленный зарядом встроенных в них белковых молекул. Установлено, что поверхность мембран, как правило, заряжена отрицательно. Поэтому находящиеся в растворе катионы могут образовывать двойной электрический слой; иными словами: слои электрических зарядов разного знака, но с одинаковой поверхностной плотностью располагаются весьма близко друг к другу. Такой слой (биологи называют его неперемешиваемым), формируясь на корневых клетках, оказывает сильное влияние на питание растений. И это вполне понятно: ведь тогда одновременно с мембраной на каждой клетке корня образуется слой, обла-

дающий довольно высокой электрической емкостью и с сильным электрическим полем внутри (до 10^6 В/см). И, конечно, ионам питательного раствора, имеющим свой заряд, не так-то легко пробиться через этот двойной электрический слой.

На этом завершается повествование о далеко не полном перечне «профессий» «демона» Максвелла. Мы не стали раскрывать такие функции мембран растительных клеток, как защита содержимого клетки от внешней среды, запуск внутриклеточного «производства», выделение его «отходов» и другие. Это не входит в нашу задачу. Но мы пока ничего не сказали о генерировании биопотенциалов, а ведь это тоже из области биофизики!

Генератор биопотенциалов

В начале нынешнего века немецкий электробиолог Ю. Бернштейн и некоторые другие ученые, зная, что в растениях «гуляют» различные электрические потенциалы, а на мембране генерируется электрический ток, сделали логический шаг — попытались установить их общность. Замечательный русский физиолог В. Ю. Чаговец (1873—1941) в те же годы, применяя точные количественные методы физической химии к исследованию биопотенциалов, впервые объяснил их возникновение диффузией ионов. Потом определили сопротивление этой структуры у отростка нервной клетки, или, как его называют за большую толщину, гигантского аксона, кальмара во время распространения по нему потенциала действия. Оказалось, что в этот момент электропроводность мембраны резко возрастает, а ход кривой ее изменения во времени хотя и в первом приближении, но повторяет форму потенциала действия. Таким образом удалось узнать, что в основе потенциала действия лежит кратковременное повышение ионной проницаемости мембраны, т. е. в это время по ней сильнее проходит электрический ток.

Кроме того, в лаборатории В. П. Скулачева был обнаружен еще один весьма важный факт. Оказывается, одновременно с разностью электрических потенциалов за счет перепада концентраций ионов на внешней и внутренних сторонах мембраны формируется и поперечное (относительно мембраны) электрическое поле. Удалось даже измерить создаваемую им разность электрических потенциалов. Возможно, и она участвует в межклеточной передаче информации.

Происхождению электричества зеленой клетки посвящены бесчисленные исследования, причем количество их с каждым годом растет. Есть основания надеяться, что в ближайшие годы мы узнаем много нового и существенного о генерации электричества на мембранах, о потенциалах действия и их роли в управлении различными физиологическими процессами, о путях повышения продуктивности сельскохозяйственных культур с помощью электростимулирования и о многом другом. Пока же имеющиеся данные лишь приоткрывают завесу.

Мембранный генератор тока — весьма чувствительный механизм. При неблагоприятных внешних факторах (охлаждение, нагрев, засоление и др.) происходит стимулирование его работы, и это отзывается на повышении устойчивости клеток, а следовательно, и растения в целом. Если организм находится в нормальных для него условиях, режим действия мембранного ионного «насоса» соответствует оптимуму расхода энергии. Ну, а когда что-то серьезное нарушает метаболизм, то включаются все резервы.

В основном вырабатываемый на мембранах электропотенциал успешно справляется со своими обязанностями регулятора многих физиологических процессов, проходящих даже в экстремальных условиях. Но не надо думать, что выживаемость организма обходится ему дешево.

В одном из экспериментов в ткани проростка овса ввели цианид калия — вещество, подавляющее процесс дыхания, — тем самым блокируя перенос электронов в дыхательной цепи. И уже через минуту наблюдалась быстрая деполяризация мембран. При этом выходящий из клетки калий двигался в направлении, противоположном действию физических движущих сил. Следовательно, клетке во имя своего спасения пришлось затратить огромное количество энергии. В другом опыте при возникновении потенциала действия наблюдали увеличение концентрации хлора в 300 раз. Если учесть, что движущей силой при этом являлся электрохимический потенциал, станет ясно, насколько велики затраты энергии при зарождении такого электроимпульса.

Сильное влияние на величину потенциала оказывает свет. Например, в водорослях через 15—20 мин после его включения напряжение на плазмалемме изменяется с —250 до +150 мВ. Чередование интервалов свет—темнота (по 3 мин) приводит к увеличению токов действия от 10—15 до 100—150 мкА/см² (в другом опыте — до 180). Считается, что виновники таких скачков — ионы водоро-

да, которые выделяются из хлоропластов при освещении и поглощаются ими в темноте.

На электрических параметрах растения сказывается и газовый состав окружающей атмосферы. Так, если в нем содержание углекислого газа поднимается всего на 5 %, то на мембранах находящейся в этой среде водоросли полностью исчезает разность электрических потенциалов. И это не просто изменение какого-то параметра, а реакция организма, призванная спасти его от гибели.

Один из наиболее значимых для растений экологических факторов — температура. Реакция организма на ее перепады тоже начинается с изменений в генерации тока и электрических характеристик мембран. Показательны в этом отношении опыты с водорослью нителлой. Чтобы быть уверенным в истинности получаемых данных, ее выращивали в аквариумах с искусственно подготовленной прудовой водой при интенсивности освещения лампами дневного света 300 лк (это характерно для естественных условий ее произрастания). Затем воду медленно нагревали от 15 до 40 °С. И, как показали замеры, соответственно постепенно активизировалась работа электрогенного насоса, т. е. усиливалась перекачка ионов водорода (у водорослей разность электрохимических потенциалов на мембране создается в основном за счет разности концентрации ионов водорода и калия). Причем, пока температуру поддерживали в пределах 15—25 °С, увеличение разности электрических потенциалов шло равномерно — около 1 мВ на каждый градус. После перехода границы в 25 °С мембранный потенциал резко «подскочил» и начал повышаться с интенсивностью 5—10 мВ на один градус. Одновременно вдвое уменьшилось электрическое сопротивление мембраны и на столько же выросла ее емкость. Оба показателя достигли минимума и максимума при температуре 30 °С, а разность потенциалов при этом превысила 200 мВ. Лишь при дальнейшем повышении температуры водоросль не выдержала борьбы и, исчерпав свои резервы, начала резко снижать разность потенциалов. При 38 °С она достигла первоначального значения около 120 мВ, т. е. силы, стимулирующие работу электрогенного мембранного насоса, иссякли. Одновременно в растении резко упало содержание АТФ, остановилось движение цитоплазмы. Словом, стало ясно: его клетки находились накануне гибели. Проведенные исследования наглядно демонстрируют, что при остановке движения зарядов и прекращении генерации тока растение погибает.

Итак, растения с помощью мембраны весьма искусно производят и используют электричество для обеспечения своей деятельности. Мизерные заряды ионов, подчиняясь требованиям метаболизма клетки, увеличивают или уменьшают количество вырабатываемой электроэнергии, выполняют другие жизненно важные функции. Да, мы вправе сказать: на биологической мембране происходят события самого разнообразного характера, поэтому правомочно сравнивать ее с уникальной миниатюрной электростанцией и биохимической фабрикой.

Более того, учитывая удивительно изощренное, по существу, электронное строение микроскопической мембраны, некоторые ученые рассматривают ее и как устройство типа вычислительной машины. Ибо она способна не только выполнять, но и управлять программой, записанной в ДНК и РНК, а также поступающей извне информацией. Считают, например, вполне возможным, что именно в этих структурах заключены схемы быстродействующей «памяти» и других важных элементов «мозга» клетки.

Шведский ученый Х. Хиден предположил: для этой роли наиболее подходящи белки клеточных мембран. Это связано с тем, что под действием электрических сигналов или химических веществ они меняют свою форму и перестраиваются в пространстве. Кроме того, только белки способны безошибочно «распознавать» какую-либо молекулу среди множества других, не имеющих с ними химического сходства. Наконец, белки быстро реагируют на электрическое поле, трансформируют электрическую энергию в энергию молекулярных и клеточных процессов.

Не зря поэтому сверхпроводниковым белковым соединениям прочат великое будущее в бионике. Доводы? Биологические системы обладают самой большой емкостью информации на единицу объема, наибольшей эффективностью преобразования световой энергии в электрическую, химическую и химической в механическую, наилучшей селективностью каталитических свойств, наивысшей продуктивностью химических превращений. Человечеству предстоит не только понять, как действуют подобные биологические системы, не только эффективно вмешиваться в их работу в интересах медицины, сельского хозяйства и других отраслей, но и научиться конструировать системы, обладающие столь же замечательными свойствами, как и биологические.

Ученых привлекает компактность «схем», быстродействие и экономичность передачи информации в живых систе-

мах. Так, молекула хлорофилла при фотосинтезе получает сигнал в виде кванта света, после чего переходит в возбужденное состояние и дальше практически без потерь передает этот сигнал, запуская цепь последовательных физико-химических превращений. Структуры, ответственные за фотосинтез в клетках листа, имеют размеры порядка 10 нм. На 1 мм² помещается более миллиарда таких элементов. Еще плотнее — до 3000 миллиардов на 1 мм² — упакованы микротрубочки внутри нейрона.

Так что сооруди мы подобие биологической ультрамикросхемы, и в объеме всего 1 см³ удалось бы разместить память большой ЭВМ. Оптимисты предполагают, что такой белковый «кубик» можно будет вживлять прямо в мозг, обогащая человека сразу всеми знаниями. Но это пока прогнозы из области фантастики. Хотя, по предположениям специалистов, первые ЭВМ на биологической основе появятся чуть позже 2000 г. Ученые XXI в., вероятно, будут выращивать подобные компьютеры в специальных ферментерах, как мы выращиваем овощи в теплицах. Такой компьютер, очевидно, сможет перестраиваться на решение самых разных задач — стоит только изменить условия его произрастания.

Задача сегодняшнего дня — глубже проникнуть в тайны электрических взаимодействий живых организмов, прежде всего в секреты мембран, которые представляют собой универсальную систему регуляции. И стоит она над другими метаболическими системами регуляции, осуществляя координацию их функций. Основным средством управления физиологическими процессами является передача информации посредством генерируемых на мембранах градиентов электричества, или, как их принято называть, биоэлектрических потенциалов (БЭП). Они — еще одно величайшее достижение растительных организмов, которому мы посвятим целую главу.

Листочек с корнем говорит

Природа — сфинкс. И тем она верней
Своим искусом губит человека,
Что, может статься, никакой от века
Загадки нет и не было у ней.

Ф. Тютчев

Электрический язык растений

Многие встречали на торфяных болотах росянку — маленькое неказистое растеньице с прикорневой розеткой листьев и мелкими скромными цветками на прямом безлистном стебле. Верхнюю сторону ее зеленых «ладошек» покрывают красные щетинки, заканчивающиеся капелькой клейкого сока (отсюда и название растения). Если на такой лист попадает мошка, она приклеивается, и, когда пытается освободиться, щетинки начинают загигаться внутрь листа, затем заворачивается и лист, скрывая жертву. Этот оригинальный способ питания выработался у росянки для дополнительного получения азота, которым крайне бедна торфяная почва.

Немало и других растений, органы которых способны к целевому движению: мухоловка, мимоза стыдливая, тюльпан, подсолнечник, василек и др. Своего рода чемпион среди них — альпийская горечавка; она закрывается всякий раз, как только на солнце набегают тучка, и открывается с первыми лучами.

Изучение подобных двигательных реакций в начале нашего столетия привело к возникновению интереса к принципам организации сигнализации между отдельными частями растения. Позднее выяснилось: управляют ею электрические сигналы, без которых не обходятся самые различные физиологические процессы. Например, между тканью нектарника и обслуживающими его проводящими пучками у цветков липы были замерены электрические импульсы (в момент легкого механического раздражения цветка). Оказалось что они стимулируют образование нектара. Так растение решает жизненно важную задачу воспроизведения себе подобных организмов: только насекомое садится на цветок, как сразу же начинается выделение нектара. Пока насекомое доберется до аппетитных капелек, оно обильно вымажет лапки и тельце в пыльце и затем послужит доброму делу — продолжению рода лип.

Очень сильно отзываются растения электроимпульсами на свет и даже на различную длину его волн, на все возможные температурные, химические и физические раздражения. Этим универсальным кодом отдельные их участки «переговариваются» между собой. А нельзя ли постичь этот язык, чтобы уметь «разговаривать» с живыми клетками, узнавать их потребности, влиять на формирование растений — подданных зеленого царства? Фантастика? Пока — да. Но «Фантазия, — подчеркивал В. И. Ленин, — есть качество величайшей ценности», без нее невозможно было «даже открытие дифференциального и интегрального исчисления»². Мы же ведем речь о биологии, где все гораздо сложнее, все недоступнее для человеческого познания.

Замеры электрических импульсов показали: скорость распространения сигналов в растении невелика: 10—15 м/ч. Но бывает и больше — поврежденный корень «сообщает» о своей беде стеблю уже со скоростью 70—100 м/ч. Конечно, по сравнению с нервной системой человека, которая посылает в мозг сигнал о ранении пальца со скоростью 100 м/с, это не много. И все-таки сигнал делает свое дело: возбужденный стебель помогает корню устранить повреждение и, в свою очередь, передает раздражение листьям, а все вместе они, откликаясь, сильно изменяют активность корня.

Как правило, поврежденная часть корня, стебля или листа негативируется по сравнению с неповрежденной, т. е. становится электрически отрицательной. Величина таких потенциалов (их называют потенциалами повреждения) варьирует в пределах от 20 до 120 мВ и более. Правда, они довольно неустойчивы, быстро уменьшаются, вплоть до исчезновения и изменения полярности. Это зависит от вида и состояния растения, от того, какая его ткань в опасности, каким агентом и с какой силой оно повреждено и от многих других причин. Например, у вики в одном из опытов сразу после повреждения величина потенциала составляла —68 мВ, через час — —23, а через 24 ч — уже +53 мВ. У других растений при повреждении наблюдается несколько иная картина.

И. И. Гунар и Л. А. Паничкин (Московская сельскохозяйственная академия им К. А. Тимирязева) довольно длительное время изучали биоэлектрическую реакцию листа на раздражение корня и черешка. Они на 2 мин опускали

² Ленин В. И. // Полн. собр. соч. Т. 45. С. 125.

корни фасоли в концентрированный раствор обыкновенной пищевой соли и через 2—4 с наблюдали увеличение потенциала на черешке на 2—3 мВ. Спустя 260—280 с после начала раздражения в том же месте регистрировали уже отрицательный всплеск потенциала с амплитудой 65—75 мВ. При этом если фаза подъема занимала всего 15 с, то фаза спада — ровно вдвое больше. К тому же после прохождения тока повреждения разность электрических потенциалов еще 20—30 мин оставалась выше обычной на 10—12 мВ. Причем чем больше была концентрация соли, тем резче менялась разность потенциалов листа фасоли.

Совсем иные закономерности наблюдались при температурном раздражении. Так, нагревание питательного раствора до 80 °С вызывало серию возрастающих по амплитуде отрицательных всплесков потенциалов. Другой вид раздражения — черешок листа перерезали в воздухе и в питательном растворе — сопровождало мгновенное отрицательное отклонение потенциала в основании листа с амплитудой 50—60 мВ.

Это весьма важные наблюдения, но их авторов они не удовлетворили. Они интересовались не столько перепадами разности потенциалов, сколько реакцией растения на раздражения физиологическими процессами. В результате успешно выполненных экспериментов обнаружено, что синхронно с биоэлектрической реакцией меняется скорость водного тока в растении, а чуть позже возрастает интенсивность фотосинтеза и транспирации (электрическое возбуждение ведет к открытию самого чувствительного микропорного органа листа — устьиц). Авторы пришли к выводу: в ответ на повреждение корневой системы — после получения об этом электрического сигнала — растение резко перестраивает основные физиологические и биологические процессы, оно мобилизует все свои ресурсы для того, чтобы продолжить жизнь и дать новое поколение. В этом заключается биологическая суть электрической сигнализации. С годами все больше накапливается данных, подтверждающих эту истину.

В последние годы установлена тесная взаимосвязь биоэлектрических потенциалов с поступлением и передвижением веществ в растениях. В частности, изменение разности потенциалов вдоль корня и стебля влияет на перемещение в них различных элементов питания. Растения искусно используют эти взаимосвязи в своей жизнедеятельности. Плоды или иные растущие ткани посылают био-

электрические импульсы — запросы на получение ассимилятов (продуктов фотосинтеза). Не исключено, что они же каким-то образом ориентируют и транспорт этих соединений. Основной продукт фотосинтеза — сахара (нейтральные по своей природе), скорее всего, соединяются с имеющими заряд фосфатами, после чего движутся под действием разности электрических потенциалов.

Но наиболее интересно то, что происходит с гормонами роста. Участок ткани, обработанный ауксином, приобретает положительный заряд по отношению к контрольному, а вызванные им изменения потенциала носят характер медленных затухающих волн. В свою очередь, сам ауксин отклоняется, как правило, в сторону положительно заряженных участков растительной ткани. И что тут первично, а что вторично, пока не ясно, хотя имеются сведения о способности ауксина запускать и активизировать работу электрогенных насосов на мембране. И делает он это тем лучше, чем больше в сфере его действия разность потенциалов.

Мало изучен и механизм преобразования биоэлектрических импульсов в метаболическую активность клеток. Некоторые исследователи склоняются к тому, что это осуществляется вследствие частичной деполяризации мембран и связанных с ней изменений в клетке. Имеются и другие объяснения. В частности, обнаружено, что при распространении потенциалов возбуждения по проводящим пучкам усиливается образование свободных радикалов, а они — очень активные частицы, имеющие свободный заряд. Причем больше их возникает при прохождении волны возбуждения в липидах, т. е. в веществах самих мембран. Отсюда и все последствия в клеточном метаболизме. Однако соответствующих опытов проведено недостаточно, поэтому отмечать иные формы образования электрических импульсов в растениях сегодня нельзя.

Установление специфических ответов растительного организма на то или иное изменение среды потенциалами действия — лишь одна сторона деятельности электрофизиологов. Не менее существенна и вторая — разработка методов оценки растений по их биоэлектрическому состоянию.

Уже давно не секрет: некоторая разность электрических потенциалов существует не только между различными органами растений, но и между его отдельными анатомическими элементами. Например, центральная жилка листьев ряда культурных растений электроположительна по отношению к поверхности зеленых «ладошек». Значитель-

ные разности потенциалов существуют между отдельными частями стебля, корня, цветка. Тот же потенциал покоя присущ и различным растительным тканям. Так, у мелких клеток флоэмы он составляет 150—160 мВ, у крупных — 60, у коры и сердцевины — около 50 мВ.

Изучение распределения поверхностных потенциалов покоя у растений дает информацию о столь важном показателе, как полярность, иными словами — о специфической ориентации в пространстве процессов и структур, приводящей к возникновению морфологических и физиологических различий на противоположных сторонах клеток, тканей, органов и растений в целом.

Существует и биоэлектрическая полярность, по уровню которой можно с достаточной точностью судить о наличии отклонений от нормы в развитии растений, об особенностях индивидуума. Правда, при исследовании топографии биопотенциалов, проведенном С. Н. Маслобродом в Молдавии, он пришел к выводу: по данному типу полярности заметно отличаются даже различные сорта одной и той же культуры. При этом специфическое распределение потенциалов у растения устойчиво несколько суток, а у прорастающих семян — несколько часов. Кроме того, на примере кукурузы он определил, что уровень потенциала повышается в местах прорастания корешка и верхка, выпячивания семечки, а в початке распределение потенциалов соответствует расположению зерновок.

Все эти знания, несомненно, могут найти практическое применение в селекции растений и агрономии. Скажем, в Центральной генетической лаборатории им. И. В. Мичурина разработана оригинальная методика электрофизиологического определения зимостойкости различных сортов яблони. В основе ее лежит измерение при помощи специального устройства ответной биоэлектрической реакции побегов яблони на импульсное электрическое раздражение напряжением 100 В в течении 5 с.

Но не только биопотенциалы сигнализируют о морозостойкости растений. Ее можно определять даже простой регистрацией низкочастотного электрического сопротивления тканей. Такой метод уже применяют для быстрого определения относительной морозостойкости озимых культур. Он основан на том, что в процессе их закаливания происходит значительное накопление сахаров, а это приводит к увеличению вязкости внеклеточной жидкости, по которой может проходить электрический ток, т. е. к снижению подвижности носителей тока (ионов) в этой среде. В резуль-

тате возрастает сопротивление тканей озимых растений току низкой частоты и тем сильнее, чем больше растением накоплено сахаров, т. е. чем лучше оно подготовлено к перезимовке. Однако для использования в полевых условиях этот подход еще мало пригоден, так как электропроводность биологических тканей зависит от многих и сильно изменяющихся факторов — температуры, содержания воды, мембранной проницаемости, ионной концентрации и т. д. Вот почему метод определения зимостойкости путем измерения электросопротивления в настоящее время удобен лишь для климатических камер. Учитывая то, что сейчас селекционеры все чаще выводят новые сорта именно в искусственно создаваемых условиях, которые подвластны точному контролю, этот метод находит широкое применение.

Весьма своеобразны по распределению потенциалов корни, ткани которых сильно отличаются по способности генерировать и проводить электрический импульс. Если в окружающей среде содержится калий, то корень генерирует токи, выходящие из его верхней части и возвращающиеся через кончик. Объясняется это тем, что клетки последнего активно делятся, а для образования новой цитоплазмы требуется большое количество калия. При указанной направленности прохождения зарядов данный элемент обильнее поступает туда, где он в постоянном дефиците. Если же в среде много натрия, то корень посылает ток как из своего кончика, так и из основания. Кроме того, вблизи корня возникают ритмические колебания потенциала с периодом в несколько минут.

Установлены интереснейшие электрические свойства не только корня в целом, но и его мельчайших (длиной от 0,05 до 10 мм) отросточков — волосков. Именно они (а каждый из них живет совсем мало — 10—20 дней) поглощают из почвы воду и растворенные в ней питательные вещества, снабжают ими все растение. В почве корневые волоски первыми встречаются с вредными веществами, первыми и погибают, успев подать сигнал тревоги. Каким образом? Раньше считали, что посылкой по проводящим тканям специально синтезируемых химических веществ. Однако теперь сомнений нет: в другие части корня, стебель и листья они посылают электрический сигнал.

О том же свидетельствует опыт, поставленный в Агрофизическом научно-исследовательском институте (Ленинград). Там изучали формирование мембранного потенциала корневых волосков, а в качестве раздражителей выбрали

фитотоксины — ядовитые для растений вещества, выделяемые различными организмами. Достаточно, чтобы в почвенном растворе было 0,1 мг/мл таких веществ, и рост проростков томатов, редиса, моркови, некоторых других овощных культур полностью прекращается. Первой на их введение в почву реагирует электрическая система мембран корневых волосков: они быстро и сильно деполаризируются, многократно увеличивается их электрическое сопротивление. В результате мембранный потенциал поднимается на высокий уровень, это и есть предупреждение остальным тканям и органам растения о надвигающейся опасности.

Где же те «провода», по которым передаются электрические сигналы? В основном импульсы на далекие расстояния проходят по клеткам флоэмы, расположенной в центре корня и стебля (по ним же синтезируемые в листьях сахара перемещаются в другие части растения). Стоит перерезать или удалить проводящие пучки флоэмы, как распространение биологических электросигналов, возникающих под воздействием различных ядов, ослабевает или совсем прекращается. Хотя, вероятно, в растениях есть и другие каналы, по которым распространяется потенциал действия. Поиск их продолжается. Сложность его обусловлена и тем, что электрические импульсы, проходящие в стеблях и листьях, хорошо регистрируют электроды, прикладываемые прямо к их поверхности. А в корнях таким способом ничего обнаружить не удастся, так как мешает своеобразное анатомическое строение тканей последних. Здесь поверх проводящих пучков расположена кутинизированная эндодерма, внешняя часть которой состоит из жирового вещества кутина. Он хороший изолятор, препятствующий прохождению потенциалов действия, в результате чего те направляются в обход через влажную почву и рассеиваются.

С таким различием в анатомическом строении стебля и корня, по-видимому, связано и известное садоводам угнетение деревьев, чьи стволы при посадке глубоко (выше корневой шейки) заделаны в почву. В этом случае поступающие в стебель биопотенциалы не передаются по растению дальше, а шунтируются во влажную землю. Это приводит к нарушению физиологических процессов, в чем не раз убеждались экспериментаторы. Так, на стебли гречихи и пшеницы накладывали полоски фильтровальной бумаги, смоченной соевым раствором. Потенциал проводящих пучков тут же падал, параллельно заметно ослаблялось передвижение ассимилятов из листьев в корень.

Правда не всегда удается зафиксировать разность потенциалов между корнем и надземной частью растения. Это, вероятно, связано с тем, что в корневой шейке преобразуется форма потенциала действия. Тем не менее надземная и подземная части растений в первую очередь связаны электрофизиологически, а уж затем — через водный ток и ионы.

Феномен чувствительности

Удивительны, порой неожиданны и непредсказуемы электрические свойства растений, их непревзойденная способность реагировать на самые ничтожные изменения окружающей среды. Они определяют изменения влажности почвы точнее самого совершенного прибора и направляют в сторону воды корни, отвечают реакцией на световые импульсы менее $1/10000$ с. Даже человеческий глаз на такое не способен. Усик растения гороха, например, реагирует на раздражение, которое вызывает небольшой шерстяной волосок массой $0,00025$ мг. И спустя несколько секунд он изгибается столь энергично, что его движение можно наблюдать даже невооруженным глазом. Подобных своеобразных рекордов можно привести немало. Все это порождает не только всевозможные научные гипотезы, но и фантастические вымыслы, спекуляции, нездоровый ажиотаж.

Многие известные ученые, восхищаясь совершенством устройства и поведения растений, приходили к мысли, что они, как и животные, имеют нервную систему, мозг и т. д. Например, выдающийся эволюционист Ч. Дарвин (1809—1882) изумлялся сходству между движениями растений и многими действиями, производимыми низшими животными, и даже допускал «мозговую функцию корней». Основоположник физиологии человека И. П. Павлов (1849—1936) спрашивал: «Движение растений к свету и отыскивание истины путем математического анализа — не есть ли, в сущности, явления одного и того же ряда?»³

Ну хорошо, скажете вы, эти гении в своей области знаний далеки от физиологии растений и потому их можно понять. Как говорится, великим людям свойственны и великие ошибки. Подведем под это оправдание и Д. Ч. Боса (мы о нем уже рассказывали): по его словам, он был введен в заблуждение господствующим убеждением, что возбудимость растений не ниже возбудимости животных.

³ Павлов И. П. Сочинения 1951. Т. 3, кн. 1. С. 38.

А сколько было в начале нашего века шумихи вокруг чувствительных растений, сколько было написано трудов об этом?! Многие авторы находили не только нервы, но и душу у растений, приписывали им всякие небылицы, вплоть до того, что они распознают хорошего и плохого человека и даже... убийцу. Так, «усовершенствованный» неким К. Бакстером «детектор лжи», подключенный к растениям, творил в руках этого советника ньюйоркской полиции просто чудеса! Драцены (с этими цветками экспериментировал Бакстер) реагировали, когда он в их присутствии резал себе палец, бросал в кипяток живых креветок, обнимал любимую девушку. Они же «волновались», стоило в комнату войти человеку, накануне сломавшему стебель в соседнем горшке. Если мимо растения, ранее находившегося в помещении в момент совершения там убийства, пропускали цепочку людей, среди которых был и подозреваемый в преступлении, оно «указывало» на него изменением напряжения своих биотоков.

Еще дальше пошел американский инженер Совен. Он «установил»: между растением и человеком может возникнуть определенная привязанность. В результате оно может безошибочно реагировать изменением биопотенциалов на различное настроение человека, даже если он и находится на другом конце Земли. Были и такие исследователи, которые обнаруживали «телепатическую» связь между растениями, приписывали им способность анализировать самые сложные ситуации и сигналы, подтверждая это «точными» экспериментами.

Известный советский электрофизиолог, длительное время заведовавший кафедрой физиологии растений Московской сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева, профессор И. И. Гунар в свое время пытался воспроизвести некоторые из подобных опытов. Он использовал аппаратуру, гораздо чувствительнее той, с которой работал К. Бакстер. Тем не менее растения никак не реагировали изменением потенциалов на подрезание соседних растений ножницами и другие «преступные» действия. Однако стоило лаборанту подойти ближе к сосуду с мимозой, подсоединенной к гальванометру, и стрелка его сразу отклонялась. Такой чувствительностью приборов и пользовались лжеученые для одурачивания несведущих людей.

Какой же секрет подобного «чуда»? «Всякое способное проводить ток физическое тело или система тел, — объяснял И. И. Гунар, — обладает определенной электрической

емкостью, которая меняется в зависимости от взаиморасположения объектов. Стрелка нашего гальванометра стояла незыблемо до тех пор, пока оставалась неизменной емкость системы. Но вот лаборант шагнул в сторону, и распределение электрических зарядов в системе нарушилось...» На это и отреагировал чувствительный прибор.

Настоящий бой лженауке дал в свое время К. А. Тимирязев. В брошюре «Столетние итоги физиологии растений» содержатся его уничтожающие высказывания по поводу «всего того фантастического вздора об органах чувств и умственных способностях растений, о чем распространялись разные Франсы и Немцы, а с их голоса — и наши молодые популяризаторы».

Велико желание человека иметь в зеленом растении своего разумного друга и помощника. Увы, это невозможно! Реально другое: глубоко познать все стороны жизни растений, научиться понимать внутреннюю сигнализацию, осуществляемую с помощью биопотенциалов, чтобы эффективно управлять ими. Давайте представим себе такую картину: вышел в поле агроном, направил прибор на пшеницу, а та ему в ответ сигналист кривыми осциллографа: «Добавьте мне водички и азотных удобрений, да и углекислого газа не мешало бы...» Вот та вожденная сенсация, которую при успешном изучении электрических свойств растений вполне можно воплотить в жизнь в недалеком будущем.

Сегодня мы находимся на ближних подступах к этому. В наши дни все чаще и чаще во многих лабораториях получают данные о свойствах клеточной мембраны, об электрических взаимодействиях в растительном организме, об его реакции биопотенциалами на изменение условий произрастания. Понятнее становятся причины удивительных способностей листьев и стеблей к быстрому движению, закручиванию усиков, взаимоотношений трав и деревьев между собой и с насекомыми, другие феномены зеленого царства.

Не станем останавливаться на этом, — есть немало книг, увлекательно рассказывающих о прекрасном и удивительном растительном мире. Среди них мы особо советуем читателям, интересующимся электрическими явлениями в растениях, две: С. Г. Галактионов, В. М. Юрин «Ботаники с гальванометром» [М.: Знание, 1979] и А. Гэлстон, П. Девис, Р. Сеттер «Жизнь зеленого растения» [М.: Мир, 1983].

И все-таки об одном феномене — биологических часах, природа которых раскрыта недавно с помощью биоэлектродных потенциалов, — рассказать будет небезынтересно.

Очевидно, каждый из нас поражался способности цветков тюльпана, виолы и других растений закрываться и раскрываться в одно и то же время. Шиповник, например, раскрывает свой цветок ранним утром — в 4—5 ч, мак — в 5, одуванчик — в 5—6, вьюнок — в 8, мать-и-мачеха — в 9—10, табак душистый — в 20, ночная фиалка — в 21 ч. А как прекрасна синь-голубизна цветущего поля льна! Но не каждому дано наслаждаться этим незабываемым зрелищем, ведь лен цветет только ранним утром. Не зря на селе подшучивают друг над другом, спрашивая, сколько лепестков у льняного цветочка. Кто не знает — тот долго спит.

Создатель системы классификации растительного и животного мира К. Линней (1707—1778), исследовавший ритмы раскрытия бутонов различных растений, построил настоящие цветочные часы. Каждый час одно из посеянных им растений раскрывалось навстречу солнцу, другие в это время оставались закрытыми. Немало любителей клумб-часов живет и в наше время.

Цветы — самый наглядный пример из множества биологических ритмов, соблюдаемых растениями. Это позволяет им нормально развиваться, экономить энергию, строить материалы. Внутренние «часы» работают надежно даже в том случае, если на несколько дней искусственно устранены внешние признаки суточного ритма (например, колебания температуры воздуха). Не одно поколение ученых билось над разгадкой тайны биологических часов. Совсем недавно познать ее удалось профессору Г. Г. Швайгеру (ФРГ). Помогла ему в этом зеленая морская водоросль с экзотическим названием ацетабулярия. Дело в том, что раньше считалось: биологические «часы» живых организмов «заводятся» в ядре клетки путем считывания закодированной наследственной информации. Г. Г. Швайгер удалял ядро у водоросли, но она по-прежнему подчинялась свойственному ей ритму жизни. Значит, истинная причина заключается в другом. В чем? Оказалось, что сначала на «белковой фабрике» клетки производится специфический белок — протеин X. Затем это вещество вводится в мембрану. Когда его концентрация в ней превышает определенный уровень, его поступление прекращается, а стоит ей опуститься ниже критического уровня, и синтез протеина снова возрастает. Этот непрерывно идущий процесс и задает ход биологическим «часам».

При чем же здесь электричество? — спросите вы. Узнали и это. С помощью простейшего экспериментального прибора в течение многих дней Г. Г. Швайгер измерял разность электрических потенциалов между нижним и верхним концами водоросли и выяснил, что при постоянной температуре среды и неизменном освещении на самой внешней мембране наблюдается все тот же эндогенный (производимый внутри организма) околосуточный ритм изменения электрического потенциала.

Ну, а существуют ли в клетке одни биологические «часы», или их несколько? Чтобы получить ответ, решили выяснить, насколько подчинено суточному ритму распределение хлоропластов. Обнаружили, что в дневное время большая часть осуществляющих фотосинтез зеленых пластид находится в верхней части гигантской клетки (ацетабулярия состоит из одной клетки), в «шляпке» водоросли. Последняя же всегда стремится повернуться так, чтобы на нее падал проходящий через морскую воду свет. Ночью, напротив, хлоропласты частично перемещаются в нижнюю часть клетки. Более того, подчиняясь внутреннему ритму, они даже при одинаковом освещении и постоянной температуре совершают эти движения вверх и вниз.

Параллельно измеряли выделение клеткой кислорода. Оказалось, что и оно регулируется внутренними «часами» ацетабулярии. Стало быть, в живом организме «идут» только одни «часы», и их безупречный ход непосредственно связан с электрическими сигналами, рождаемыми внутри клетки.

Тайна зеленого листа

Растение — посредник между небом и землею. Оно — истинный Прометей, похитивший огонь с неба. Похищенный им луч солнца приводит в движение и чудовищный маховик гигантской паровой машины, и кисть художника, и перо поэта.

К. А. Тимирязев

Всемогущий фотон

Фотосинтез, пожалуй, самое уникальное, самое восхитительное явление природы, также связанное с электрическими взаимодействиями в растении. Во многом еще неясный этот процесс хранит разгадку того, как благодаря энергии солнечных лучей, благодаря фотонам в зеленом листе образуется пища для всего существующего на Земле.

Тайна зеленого листа занимала умы еще древних мыслителей. Так, Теофраст (около 372 — около 287 г. до н. э.) — ученик и последователь Аристотеля — задумывался, зачем растениям листья? Ведь не для того только, чтобы украсить пальму, оливу, лавр или левкой. Затем многие ученые высказывали самые различные предположения о роли зеленых «ладошек». Первым ближе всех к истине подошел английский священник С. Гейлс. В книге «Статика растений», вышедшей в 1727 г., он писал: «проникающий в ткани листа свет, может быть, содействует облагораживанию веществ, в них находящихся».

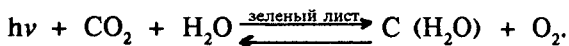
Официальной датой открытия фотосинтеза считается 1771 г. Тогда английский философ-материалист и химик Д. Пристли (1733—1804) опубликовал данные своих опытов, которыми доказал, что воздух, испорченный горением или дыханием, становится вновь пригодным для жизни под действием зеленых частей растения. Однако прочный фундамент в познание воздушного питания трав, кустов, деревьев был заложен. Кстати, тем же даровитым ученым написана научно-популярная книга «История электричества».

Несколько позже голландец Я. Ингенхауз установил: растения выделяют кислород лишь на солнечном свете. Это был большой шаг на пути к разгадке тайны. Еще дальше продвинулся швейцарец Ж. Сенебье (1742—1809), написавший трактат «Физико-химические мемуары о влиянии солнечного света на изменение тел трех царств природы и в особенности царства растений». Он четко констатирует: углекислота разлагается на углерод и кислород силою света, причем кислород выделяется, а углерод становится составной частью растений.

Огромный вклад в познание сути фотосинтеза внес К. А. Тимирязев (1843—1920). Он показал, что этот процесс осуществляется в строгом соответствии с законом сохранения энергии. Поглощаемая хлорофиллом энергия солнечного света преобразуется им и затем передается на совершение химических реакций, приводящих к образованию из углекислого газа и воды органических веществ, т. е. преобразованная солнечная энергия запасается в виде потенциальной химической энергии. Тимирязев определил: фотосинтез идет только в лучах, поглощаемых хлорофиллом, и его интенсивность зависит от интенсивности и качества света. Исходя из этого представления, он оценил спектральные свойства хлорофилла и способность его силь-

но поглощать красные лучи, как несущие наибольшее количество энергии и фотохимически наиболее активные.

Но до сих пор ученые ломают головы над расшифровкой механизма фотосинтеза, ведь он и сейчас еще до конца не выяснен. Казалось бы, все понятно из очень простой формулы:



Но над стрелками надпись «зеленый лист», а в нем-то и сокрыты секреты, проникнуть в которые до конца не удастся. В начале формулы стоит $h\nu$ — это квант света (фотон), т. е. энергия электромагнитной волны. Именно ее зеленый лист ловит и преобразовывает сначала в простые углеводы типа $\text{C} (\text{H}_2\text{O})$, затем в длинные цепочки сахаров и т. д.

Если фотосинтез порождается фотоном, то, значит, в его основе лежат электрические взаимодействия. Здесь сомнений быть не может. Выходит, зеленый лист должен обладать какой-то электрической системой. Ею является пигмент хлорофилл, входящий в состав специфических оргanelл клетки (хлоропластов) и придающий растениям зеленый цвет.

Интересна особенность самих хлоропластов. Они могут изменять свою форму и размеры, самостоятельно передвигаться в клетке за счет недавно обнаруженных у них сократительных белков (что-то вроде мышц животного). Говоря языком науки, им присуща функциональная самостоятельность. Она необходима для выбора более удобного «места под Солнцем». Тому же служит и устройство листа: он, оказываясь, способен проводить свет через себя. Во всяком случае, когда лазерный луч направляли к кусочку ткани кукурузы, овса или фасоли, то свет проходил вглубь ее не менее чем на 2 см. Это явление возникает в результате полного отражения света стенками растительных клеток, т. е. срабатывает механизм наподобие оптических волокон (растения и здесь опередили человека). В результате падающий на растения свет переносится к клеткам, остающимся в тени. Все это подчинено единой цели — лучше ловить луч Солнца, экономно использовать полученную энергию.

Как же идет сам фотосинтез? Хлорофилл, эта сложная органическая молекула, поглотив фотон, переходит в возбужденное состояние. Иначе говоря, один из электронов молекулы хлорофилла меняет свой «статус»: он перескакивает на более высокий энергетический уровень. Энергия

поймана — теперь ее надо удержать. В этот момент молекула хлорофилла находится в своем активном рабочем состоянии и настолько напряжена, что даже меняет окраску на красно-коричневую. Правда, мы этого не замечаем, так как не способны уследить за процессом, идущим всего 10^{-3} с.

Обладающий избытком энергии электрон в соответствии с законом физики не может долго «сидеть на горе». Он должен «скатиться», чтобы избавиться от избыточной энергии, и делает это по сложной цепочке ферментов, которая называется «цепью электронного переноса», покидая хлорофилл. Обычно лишняя энергия просто переходит в окружающую среду в виде электромагнитного излучения. Однако для хлорофилла полученная от Солнца энергия вовсе не лишняя, поэтому он ее сберегает, обращая на пользу растения.

Потеряв электрон, молекула хлорофилла заряжается положительно, в ней образуется электронная «дырка». Это вакантное, привлекательное для электронов место в результате каких-то пока полностью еще не изученных процессов заполняет электрон одной из ближайших молекул воды. Последняя при этом распадается: кислород по сложным лабиринтам листа выделяется в атмосферу, а оставшийся протон устремляется в так называемый цикл Кельвина — сложный биохимический процесс, в ходе которого синтезируются углеводороды.

Хлорофилл же возвращается в исходное «зеленое» состояние и готов к новому приему фотона, к новому циклу работы. И так до бесконечности.

По нашим мирским меркам энергия отдельного кванта света ничтожна — ведь на пляже многие подвергают себя потокам квантов неделями и прилива энергии не ощущают. А вот для молекулы, поглотившей фотон, это крупное событие.

Например, квант коротковолнового ультрафиолетового света в молекуле красителя вызывает такие разрушения, что их можно сравнить с последствием прямого попадания в небольшое строение крупнокалиберного снаряда. Именно поэтому окрашенная ткань быстро «выгорает» на солнце. Замечательное свойство фотосинтеза в том и состоит, что хлорофилл, в отличие от красителя, «умеет» продуктивно использовать столь мелкие порции энергии, как фотоны.

Как уже говорилось, фотохимическая работа, идущая в листе, в конечном счете сводится к образованию сахаров за счет расщепления молекул воды и углекислого газа. Но

прежде чем это произойдет, «физическая» энергия света должна как-то видоизмениться, преобразоваться в «химическую». Во всяком случае, было принято так считать до недавнего времени. И на то, вроде бы, были основания. Ибо в ходе фотосинтеза электроны передаются «из рук в руки», так как соединения, взаимодействующие в цепи их переноса, находятся на близком друг от друга расстоянии. И в том, что тут происходят именно химические, а не электрические процессы, ни у кого не возникало сомнения. Это представлялось настолько очевидным, что ученые не приняли всерьез своего коллегу, известного английского химика П. Митчелла, когда он высказал гипотезу о появлении электричества при фотосинтезе. Лишь много позже исследователи из МГУ доказали правоту Митчелла: солнечный свет в зеленом листе превращается в самое настоящее электричество.

Оказывается, высвободившееся при разложении воды ядро водорода, разлученное со своим единственным электроном, бросается искать его. Но на своем прямолинейном пути не находит его и по законам инерции пролетает через всю мембрану. В результате там, в конце пути протонов, скапливаются положительные заряды и возникает разность потенциалов. В тончайшей мембране хлоропласта ее обнаружили и даже измерили, для чего обратились все к тем же молекулам хлорофилла (в электрическом поле они меняют свой спектр поглощения), и по этой величине судили о возникающей разности потенциалов.

Интересно и то, что в осуществлении того этапа фотосинтеза, в процессе которого преобразуется энергия, участвует лишь небольшая часть всех пигментных молекул, сосредоточенная в фотохимических центрах хлоропластов. Тем не менее здесь-то и расположены хотя и микроскопические, но самые эффективные из существующих на Земле машины электростанций и одновременно химических фабрик. Прочие молекулы хлорофилла выполняют лишь роль светособирающего комплекса (антенны). Такое разделение очень выгодно: активный хлорофилл всегда, даже в пасмурную погоду, в достатке получает солнечную «пищу».

В свою очередь, энергия от одной молекулы хлорофилла к другой передается в результате резонансного переноса. Его особенность заключается в том, что участвующие в нем молекулы очень плотно состыкованы. Благодаря чему колебательная энергия как бы переливается по единому ручью. Важнейшую роль здесь играет структура тканей.

Чтобы убедиться в этом, здоровый зеленый лист, лежащий на стекле, легонько прокатайте стеклянной палочкой. Химические компоненты в нем, естественно, сохранятся, а вот первоначальную фотосинтетическую способность он утеряет.

Ну, а какова все же суть резонансного переноса? Возбужденный солнечным светом один из электронов какой-то молекулы хлорофилла переходит, вернее, перескакивает к другим плотно прилегающим к ней молекулам, которые специализируются на дальнейшем переносе электронов. Первый переносчик поглощает определенную часть энергии активации и передает электрон следующему, где процесс повторяется. Такие переносчики, располагаясь в мембранах хлоропласта, образуют некий ряд в соответствии с величиной их окислительно-восстановительного потенциала. Таким образом, электрон переходит от одного переносчика к другому, подобно тому как низвергается по каскаду вода — с одного уступа на другой, выполняя при этом работу. Разность потенциалов между двумя соседними переносчиками превышает 160 мВ. Этого вполне достаточно, чтобы произвести реакцию синтеза молекулы фосфорной кислоты с аденозиндифосфорной кислотой (АДФ) с образованием аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ). В химической связи между двумя данными соединениями запасается значительное количество энергии — 8—10 ккал/моль.

АТФ является как бы «энергетической валютой» живой клетки, которая используется в качестве резервной. Требуемые энергетических затрат процессы в клетке из АТФ черпают энергию, выделяемую в момент расщепления ее молекулы (обратная реакция) на АДФ и фосфаты.

Образование АТФ происходит в так называемый темновой период фотосинтеза, который занимает гораздо больше времени, чем световой. Но, пока этот период не завершится, бесполезно вводить в растения новые порции световой энергии. Потому, очевидно, они растут лучше, если по небу чередой бегут облака, то закрывая, то приоткрывая солнышко. Подметив такую особенность зеленого листа, биологи из Ленинградского сельскохозяйственного института стали освещать растения в теплице импульсным светом и убедились: поочередно повторяющиеся несколько секунд света и более длительный «отрезок» времени «темноты» способствовали существенному увеличению урожая и сокращению затрат электроэнергии.

Все это носит далеко не абстрактный характер. Ибо человечество с самого своего становления, если не считать

последнего, краткого с точки зрения истории мига расцвета гидро- и атомной энергетики, прямо или косвенно использовало энергию световых лучей, запасенную растениями. Причем если исходить из энергетического баланса, то налаженное в зеленом мире производство органического вещества в высшей степени рационально и экономично. Подсчитано, что для синтеза 1 кг глюкозы растению достаточно затратить всего около 4,4 кВт·ч энергии. А если взглянуть с глобальной точки зрения?

Ежегодно растения суши связывают более 17 млрд т углерода и выделяют в атмосферу 47 трлн м³ чистого кислорода. В процессе фотосинтеза они за год усваивают около 470 трлн кВт·ч солнечной энергии — это в сто с лишним раз больше среднегодовой мировой выработки электроэнергии. Из них почти 280 млрд кВт·ч «оседают» в самих растениях. Вот он, эффект электрических взаимодействий в зеленом листе.

К сожалению, ученые не разобрались еще во всех тонкостях фотосинтеза, не научились использовать его принципы в практике. Позаимствовать у растений умение превращать свет в электричество — весьма заманчиво. Расчеты показывают: только на территорию, равную площади Москвы (в пределах автомобильной кольцевой дороги), Солнце изливает энергию, достаточную для того, чтобы обеспечить ею все нужды страны. «Хотя я верю в будущее атомной энергии, — писал известный французский физик, лауреат Нобелевской премии Ф. Жолио-Кюри (1900—1958), — и убежден в важности этого изобретения, однако я считаю, что настоящий переворот в энергетике наступит только тогда, когда мы сможем осуществить массовый синтез молекул, аналогичных хлорофиллу или даже более высокого качества». И над этим сейчас усиленно работают все новые и новые отряды ученых во всех странах мира. Идет буквально штурм проблем фотосинтеза.

А если нет света?

Казалось бы, энергии солнечных лучей, преобразованной хлорофиллом в другие виды энергии, вполне достаточно для обеспечения всех потребностей растений. Ведь сколько нужно этому организму, который не бегаёт, не прыгает, не таскает на себе грузы, да к тому же в потреблении энергии удивительно экономичен? На каком заводе, даже самом совершенном, к примеру, источником энергии могут служить те же материалы, которые являются и строительными? Та-

ких нет! А у растений это сахара и другие ассимиляты, образующиеся в итоге фотосинтеза, после чего используемые для образования более сложных веществ.

Правда, энергии, полученной и запасенной в ходе «усвоения» солнечного луча, далеко недостаточно для осуществления всего метаболизма, т. е. полной совокупности процессов жизнедеятельности растения. Для компенсации нехватки энергии в процессе эволюции подданные зеленого царства выработали и другой источник пополнения энергетических ресурсов. От трети до половины их обеспечивает дыхание (в редких случаях, когда растительные организмы вообще не имеют хлорофилл, оно становится основным источником энергии).

Упрощенно дыхание можно представить себе как процесс, в ходе которого с помощью атмосферного кислорода углеводы окисляются до углекислого газа и воды, а высвобождающаяся энергия используется в метаболизме клетки. При этом главное событие, происходящее в листьях и корнях: за счет расщепления одной молекулы глюкозы образуются 38 молекул АТФ, что становится возможным благодаря переносу электронов при участии многочисленных ферментов и ряда специфических соединений. Такой этапный перенос электронов характеризуется высокой степенью упорядоченности, чем и определяется большая эффективность использования живой клеткой энергии дыхания.

Малейшее нарушение этой упорядоченности, особенно часто возникающее из-за недостатка кислорода, чревато трагическими последствиями. Например, на плохо дренированных, заболоченных и переувлажненных почвах в корневых клетках затруднено аэробное дыхание. Из-за возникающего дефицита кислорода растения быстрее обычного расходуют запасенную в АТФ энергию, хуже поглощают минеральные вещества из почвы, а ущербность питания, в свою очередь, оборачивается плохим развитием посевов.

Дыхание, сопровождающееся синтезом АТФ, происходит в специализированных клеточных структурах — митохондриях. Это своего рода миниатюрные аккумуляторы электрического тока, которые стоят того, чтобы рассказать о них более подробно.

Биоэлектроаккумулятор

Митохондрии ботаники обнаружили более 100 лет назад и назвали их именно так исключительно за внешний вид (от греческого *мито* — нить и *хондрион* — зернышко, крупинка). Данные органеллы включены в любую клетку эукариот и имеют самый разнообразный вид — палочки, шарики, линзочки, нити длиной 0,5—10 и шириной до 1 мкм. Внутренняя часть их оболочки образует бесчисленное количество складок, перегородок, трубочек, гребней. Такое устройство связано с необходимостью иметь большую площадь поверхности для обеспечения сложных биохимических реакций.

Количество митохондрий в клетке колеблется от нескольких единиц до нескольких тысяч, и обычно они скапливаются в тех активных зонах, где в данный момент особенно нужна энергия для синтеза. Вместе с тем их число, размеры, функционирование меняются в зависимости от внешних условий и физиологического состояния клетки. Основное вещество каждой этой органеллы окружено двойной стенкой-мембраной, состоящей, как и любая другая биологическая мембрана, из сложных комплексов белков, жироподобных веществ, многочисленных ферментов.

Примечательно, что и здесь именно с мембраной связаны основные энергетические события. Надо отметить, что проходящие в митохондриях процессы, носящие общее название «дыхание», очень сложные. Упрощенно суть их состоит в следующем. Митохондрия весьма умело «высасывает» запасенную солнечную энергию из сахаров, производя за ее счет синтез аминокислот, гормонов, витаминов, строительных белков для сооружения различных структур клетки и самих мембран, а также многие другие соединения.

Хемиосматическая теория, предложенная английским ученым П. Митчеллом, дает стройное объяснение, позволяющее понять энергетические основы происходящих в митохондриях процессов дыхания. Главенствующее положение и здесь, как и при фотосинтезе, занимают ферменты — переносчики электронов, часть из которых к тому же приобрела еще профессию переносчиков протонов. Расположены они асимметрично на внутренней мембране митохондрии в строго установленном порядке, чтобы каждый фермент мог принять определенный субстрат и передать готовый продукт следующему ферменту в том же ряду. Нарушение в любой точке цепи переноса электронов полностью блоки-

рует их транспорт. А этого допустить нельзя, ибо без них не состоится самый главный акт — образование энергии на мембране. Организовано дело так, что перенос каждой пары электронов по цепи приводит к переходу через митохондриальную мембрану шести ионов водорода. Образующийся в итоге значительный перепад концентрации H^+ между двумя сторонами мембраны представляет собой потенциальный источник энергии. Энергия, выделяющаяся при обратном движении протонов уже по особым каналам в мембране, расходуется на синтез все той же универсальной энергетической «валюты» АТФ. Эта энергия используется в других местах митохондрии на всевозможные метаболические процессы.

Уникальной особенностью митохондрий является также их способность забирать и аккумулировать электроэнергию, выделяющуюся не только при химических реакциях внутри клетки, но и с существующих нередко в клетках гигантских молекулярных комплексов — суператомов, имеющих общие электроны.

Тщательно проанализировав такие уникальные «способности» этих удивительных органелл, физики предложили гипотезу об использовании запасенной в них электрической энергии для передачи информации между клетками и органами растений. Согласно ей, плавающие в растительной клетке суператомы, имея общие электроны, обладают сверхпроводимостью. Это их качество проявляется при взаимодействии с магнитным полем. Теперь прикинем: электрический потенциал такого суператома равен 0,94 В, потенциал же митохондрии — 0,25 В. Поскольку последняя имеет определенную энергоемкость, то она забирает лишь строго определенное количество энергии, автоматически отключаясь после зарядки. Остаток энергии суператома выбрасывается в виде электромагнитного излучения соответствующей частоты.

Давайте считать дальше. Для проведения любой клеточной химической реакции митохондрия должна накопить не менее $7,2 \cdot 10^{-20}$ Дж. Столько ей могут дать только те суператомы, которые несут на себе три и более сверхпроводящих электронных пар. В зависимости от количества этих пар различен и остаток энергии, а значит, и энергия и частота упомянутого электромагнитного излучения. Однако в любом случае оно ощутимо. Исходя из принципа рациональности организации живого вещества, логично предположить: растение использует его для передачи информации между клетками и органами.

Заманчивая гипотеза. Она в какой-то мере могла бы объяснить открытые в 1920-е годы крупным советским биологом и гистологом А. Г. Гурвичем (1874—1954) «митогенетические лучи» (сверхслабое ультрафиолетовое излучение живых тканей, стимулирующее деление клеток) и предполагаемые академиком АМН СССР В. П. Казначеевым «межклеточные дистанционные электромагнитные взаимодействия». Но предполагаемые электромагнитные излучения современными физическими методами пока не выявлены. Не укладывается также в общепризнанные биофизические понятия и наличие сверхпроводимости у белковых молекул митохондрий. Последняя доказана пока лишь применительно к аналогичным молекулам хлоропластов. Впрочем, все только что сказанное не должно повергать нас в пессимизм, тайн у зеленого растения еще много. Возможно, их раскрытию поможет знание электрической системы планеты Земля.

Земля — планета электрическая

Как наша прожила б планета,
Как люди жили бы на ней
Без теплоты, магнита, света
И электрических лучей?
Что было бы? Пришла бы снова
Хаоса мрачная пора.

А. Мицкевич

Конденсатор и... динозавры

Шестьдесят пять миллионов лет назад, в конце мелового периода на Земле произошла катастрофа. За кратчайший в геологическом смысле срок вымерло огромное количество разнообразных живых организмов, в том числе и самые «знаменитые» из них (с точки зрения человеческого восприятия) — динозавры. Эти гигантские наземные пресмыкающиеся, означающие в переводе «ужасные ящеры», в течение 140 млн лет были господствующими наземными животными и вдруг... исчезли с лика Земли. На смену им, многим другим ранее сформировавшимся животным пришли иные, гораздо более сходные с современными.

Подобная смена фаун в истории Земли происходила неоднократно. Палеонтологи установили, что 247, 220 и 65 млн лет назад погибло 95 % представителей всех существ на нашей планете. Известны еще семь случаев массового вымирания — тогда оно охватило от 20 до 50 % видов.

Так, в меловом периоде сначала в наибольшей мере пострадал растительный мир, фитопланктон, зоопланктон, а уж затем экологическая цепочка потянулась к гигантским бронтозаврам, монозаврам, ихтиозаврам, морским крокодилам и другим великанам, в силу своих размеров нуждающимся в огромном количестве пищи.

В научном мире насчитывается по крайней мере десятков более или менее аргументированных предположений о причинах исчезновения всех этих мастодонтов. Абсолютное большинство ученых сошлось на том, что источник беды имел внеземное происхождение. Какое? Одна из гипотез исходит из резкого скачка магнитного поля, произошедшего в силу смены полюсов. Сторонники такого объяснения убеждены: происходящее временами ослабление магнитного поля Земли оставляет ее на несколько лет почти незащищенной от космической радиации — отсюда все вышеописанные последствия.

Как же геомагнитное поле защищает нашу планету? Магнитосфера — область околоземного пространства, физические свойства которой определяются магнитным полем нашей планеты, — внешняя и наиболее протяженная оболочка планеты. Ее конфигурацию уточнили с помощью искусственных спутников Земли в конце 1950-х годов: если раньше в школьных учебниках земное магнитное поле изображали в форме яблока (магнитные силовые линии выходили из Северного полюса и входили в Южный), то, как выяснилось, на самом деле оно напоминает дирижабль или грушу. Это происходит потому, что со стороны Солнца на Землю дует солнечный ветер, точнее, солнечная плазма. Она — порождение солнечной короны и состоит из заряженных частиц, в основном из протонов, ядер и ионов гелия, а также более тяжелых положительных ионов и электронов. Все они обладают огромной кинетической энергией — от сотен до тысяч килоэлектрон-вольт. Столь сильному потоку корпускулярного излучения на расстоянии от поверхности планеты в 7—10 земных радиусов с полуденной стороны путь преграждают магнитные силовые линии, которые отклоняют заряженные частицы и не пускают их близко к планете. При этом солнечная плазма, соприкасаясь с магнитным полем Земли, разделяется на протоны и электроны. Получается, что вокруг Земли работает как бы невидимая мощная надземная электростанция.

Однако и наша планета имеет электрическую структуру. Вспомним самые крупные из многочисленных ее слоев: магнитосфера, атмосфера, гидросфера и непосредственно

«твердая» часть, которая, в свою очередь, подразделяется на земную кору, верхнюю и нижнюю мантию, ядро. Все эти составляющие тесно взаимосвязаны. Например, самая внешняя обложка Земли — магнитосфера — обусловлена электромагнитными свойствами самой внутренней сферы — земного ядра, которое и образует геомагнитное поле. Во всяком случае, согласно современной гипотезе, в электропроводящей жидкой части ядра Земли имеют место достаточно сложные и интенсивные движения, приводящие к самовозбуждению магнитного поля, т. е. события там развиваются примерно так, как генерируется ток и магнитное поле в динамомашине с самовозбуждением. Отсюда и название гипотезы — о гидромагнитном динамо.

Оговоримся сразу: теория земного магнетизма находится в самом начале своего развития и в ней многое гипотетично, — уж очень сложно познать явления, происходящие в наиболее глубокой сфере планеты. Тем более что функционирование гидромагнитного динамо связано со многими процессами не только в ядре, но и в мантии; и она тоже мало изведена, особенно в части электрических свойств.

Магнитное поле Земли имеет форму диполя. Его напряженность растет от 0,42 Э на экваторе до 0,70 Э на полюсе. И распределение образующегося поля представляет сложную картину: на планете есть места, где оно очень слабое, а есть и такие места, где оно довольно сильное. К тому же расположение магнитных полюсов Земли постоянно меняется из-за сложных и не совсем еще понятных процессов, идущих внутри Земли. Сейчас Северный магнитный полюс движется к географическому северу со средней скоростью 10 км в год. Но иногда бывает, что за день он отклоняется от своей средней позиции до 80 км. В середине 1980-х годов магнитный полюс находился от географического Северного полюса примерно на расстоянии 1500 км.

В прошлом же — и это показали палеомагнитные исследования (изучение остаточной намагниченности ископаемого кирпича, посуды и т. д.) — магнитное поле Земли неоднократно меняло свое направление на прямо противоположное. И для живого мира начиналась катастрофа. Одно из таких изменений полярности магнитного поля и произошло около 65 млн лет назад, как раз в конце мелового периода, на что имеются соответствующие доказательства у геофизиков. Именно тогда и отмечена массовая гибель динозавров и других животных-великанов.

Особую роль в электрическом балансе Земли играет ионосфера (электроносфера, или электросфера) — электрическая оболочка, окружающая планету на высотах от 50 до 1000 км. Существование ее экспериментально установили радиопизики в 1920-е годы. В последние десятилетия с помощью ракетных методов исследования зафиксировано неожиданно большое содержание ионов на высотах до 70 км. Их максимум наблюдался между 10 и 40 км, минимум — между 50 и 70 км. Происхождение заряженных частиц на таких высотах объясняется действием космических частиц. Влетая в земную атмосферу, они разбивают молекулы и атомы на ионы и электроны. В самой нижней части ионосферы последние «прилипают» к молекулам воздуха, образуя отрицательные ионы. Но при этом они не преобладают, так как в атмосфере поддерживается равное количество положительных и отрицательных зарядов или, иными словами, общая электрическая нейтральность.

Ионосфера является той областью околоземного электрического пространства, в которой энергия солнечной радиации преобразуется в другие виды энергии. Интенсивность текущих здесь электрических токов достигает десятков тысяч ампер и тесно связана с активностью нашего светила. Эти токи регистрируются на поверхности Земли как изменения геомагнитного поля, что, в свою очередь, существенно сказывается на всех биологических объектах в силу их электрического строения.

Взаимосвязь здесь довольно простая. На поверхности Земли сосредоточены отрицательные электрические заряды. Они уравниваются положительными зарядами в проводящем слое атмосферы на высотах между 15 и 30 км. Словом, мы имеем как бы две обкладки гигантского конденсатора. Внутри его существуют еще слои пространственных зарядов, т. е. данный конденсатор можно уподобить слоеному пирогу.

Между главными его обкладками постоянно течет ток, называемый током разрядки и обусловленный проводимостью атмосферы. Благодаря им огромная эта система за несколько минут могла бы разрядиться. Но ничего подобного не происходит, так как на обкладках все время поддерживается разность потенциалов. Иначе говоря, поверхность планеты и стратосфера постоянно получают все новые и новые порции зарядов. Откуда они берутся?

Сравнительно недавно выяснилось, что во время солнечных вспышек возрастает напряженность электрического поля Земли. Претерпевает она существенные изменения и

при землетрясениях, извержениях вулканов. Исходя из подобных взаимосвязей, ученые предложили оригинальную картину формирования электрических полей в атмосфере. Правда, в силу многих неизвестных сегодня она рассматривается как дискуссионная.

Итак, согласно ей, ежесекундно от Солнца к Земле устремляется огромное количество заряженных частиц, в основном протонов и электронов. На расстоянии около 10 земных радиусов они испытывают отклоняющее воздействие магнитного поля планеты, образуя пространственные электрические поля. Более энергичные частицы вторгаются в атмосферу Земли, менее энергичные остаются в магнитных ловушках. Однако какая-то доля последних все-таки оказывается в атмосфере. Здесь частицы различных видов и энергий на разных высотах поглощаются. В результате образуются как бы электрические слои, между которыми возникает дополнительная разность потенциалов.

Поскольку при колебаниях интенсивности потока протонов в глобальном конденсаторе изменяются электрические поля, то можно предположить, что нестабильны и свойства облачных образований, состоящих из ярко выраженных слоев электрических зарядов. Объемные заряды в них перераспределяются, вследствие чего облака опускаются или поднимаются, вода в них испаряется или кристаллизуется. Следовательно, энергии протонов, приходящих извне в конденсатор, вполне достаточно для смещения пространственных слоев зарядов в стратосфере. Это, в свою очередь, ведет к выделению колоссальной энергии, заключенной в массах плотного воздуха. Речь идет о грозах, ураганах и тому подобных явлениях. Потоки солнечных протонов служат для них своеобразным «спусковым механизмом». Таковы в общих чертах истоки погоды на планете.

Выходит, если встать на сторону авторов гипотезы, то Землю можно рассматривать как мощную электрическую машину, к обкладкам которой приложено напряжение порядка 250 кВ. В результате энергия электромагнитным и электромеханическим способами преобразуется в тепло недр и механическую энергию вращения ионосферы, планеты. Произведенные затраты энергии неутомимо восставливает Солнце.

Ученые сейчас усиленно моделируют многие природные явления, чтобы лучше раскрыть их тайны. Попробовали воспроизвести и влияние на живые организмы конденсато-

ра «ионосфера — Земля». Для чего на первом этапе опыта поместили в него яйца, только что отложенные самками комара, и они проходили здесь все последующие стадии превращений. Затем туда заложили еще и личинки, находящиеся на второй и четвертой стадиях развития. Таким путем экспериментаторы стремились выяснить, какой период развития кровососов самый «уязвимый» к воздействию внешней электрической среды. Оказалось, когда яички комаров развиваются в конденсаторе с первых же дней после их кладки, к окукливанию гибнет почти в 5 раз больше личинок, нежели в обычных условиях, хотя сам период их развития нисколько не меняется. Если электромагнитное поле конденсатора начинает действовать на более поздних стадиях существования личинок (второй или тем более четвертой), то период их развития несколько затягивается. Но количество выживших особей остается аналогичным контролю. Выходит, организмы наиболее чувствительны к воздействию электромагнитного поля на самых ранних стадиях жизни: тогда оно, по-видимому, «работает» как фактор генетического отбора.

Как говорится, комментарии к этому явлению не требуются: изменилось электромагнитное поле Земли — меняется генетический фонд всего на ней существующего. При резких «скачках» поля, да если они сопровождаются таким сильным мутагенным фактором, как солнечная радиация, неминуема гибель одних видов и появление других.

Подтверждают такой вывод и последние палеологические исследования, проведенные в Институте высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Академии наук СССР. По данным ученых, повторяющиеся на Земле через десятки миллионов лет смены полюсов планеты сопровождаются изменением видового состава донной морской фауны. В пользу теории геомагнитного поля Земли (а не смены климата) дополнительные аргументы дает, в частности, тот факт, что некоторые виды донных животных встречаются и в тропических, и в полярных морях. Ведь на больших глубинах условия среды постоянны, а ионизирующие излучения поглощаются толщами воды. Значит, естественные электромагнитные поля следует включать в разряд факторов эволюции живого мира, так как они могут принимать участие в образовании новых видов. Это, вероятно, и произошло в конце мелового периода развития нашей планеты, когда исчезли динозавры.

В океане электричества

Теперь опустимся в тропосферу. Именно здесь, до высоты 16—18 км от поверхности Земли, кипит жизнь. Тут все: облака, дождевые капли и снежинки, пыль — несет электрические заряды. Непосредственно у земной поверхности существует стационарное электрическое поле, которое при «хорошей» погоде имеет напряженность в среднем около 130 В/м. Однако при осадках и особенно грозах, метелях, бурях этот параметр может резко менять направление и величину, достигая иногда 1000 В/м. С высотой напряженность поля постепенно падает и на уровне 10 км не превышает нескольких вольт на метр. Заряд же дождевых капель и снежинок, наоборот, уменьшается по мере приближения к планете. Это связано с тем, что частицы атмосферных осадков основной заряд получают в облаках, а не при падении на Землю, как считалось раньше.

У электрического океана планеты есть четкий суточный ритм приливов и отливов: максимум напряженности электрического поля, скажем, в средней полосе приходится на 22—23 ч, минимум — на 7—8 ч. В иных зонах другие закономерности. В США, например, минимальные значения величины поля весной, осенью и зимой бывают в 3—6 ч, максимальные — в 19—21 ч. Летом те же показатели наблюдаются соответственно в 10—15 и 16—20 ч. В плохую погоду (туман, дождь, снег, гроза) электрический потенциал в тропосфере возрастает. Летом градиент электрического поля у Земли, как правило, ниже, чем зимой, хотя иногда регистрировали обратную картину. Замечены также годовые циклы колебаний напряженности электрического поля и 11-летние, связанные с изменением активности Солнца. Оно, кстати, оказывает решающее влияние на электрическую структуру атмосферы. Конечно, основная часть этого излучения поглощается. Однако то, что прорывается из-за понижения плотности воздуха с высотой порождает значительную неоднородность электрической проводимости воздуха за счет его ионизации.

Получается, что у Земли действует глобальный процесс разделения зарядов, в результате которого атмосфера постоянно содержит избыточный положительный объемный заряд, а на земной поверхности индуцирован нейтрализующий его поверхностный отрицательный заряд. Предполагается также, что к разделению зарядов в глобальном масштабе ведет перенос испаряющейся из морей и океанов водой положительного заряда в слой обмена на высоте 2—3 км от поверхности Земли. Однако надежных доказа-

тельств эта океаническая модель не имеет из-за трудностей наблюдения тока и отсутствия обоснованных представлений о физическом механизме разделения заряда на поверхности раздела жидкой и твердой фаз.

Тем не менее известны лабораторные эксперименты, в которых наблюдался перенос положительного заряда паром при испарении воды с плоской жидкой поверхности, а также с поверхности льда, капель и при перегонке воды в вакууме. Результаты этих наблюдений являются дополнительным подтверждением реальности океанической модели разделения зарядов в атмосфере.

Поскольку в воздухе всегда много заряженных частиц, то их движение (в основном ионов) под действием сил электрического поля создает вертикальный ток проводимости. Средняя плотность его невелика — в пределах $(2-3) \cdot 10^{-12}$ А/м (конечно, при «хорошей» погоде). Помимо этого, в атмосфере текут значительные электрические диффузионные и конвективные токи — поистине сплошной электрический океан!

Но, пожалуй, самое интересное электрическое явление атмосферы — грозные разряды. И вот что любопытно: наши предки очень сильно боялись огненных стрел и в то же время благоволили им, считали добрым предзнаменованием: «Чем сильнее первый удар грома по весне, тем лучше будет урожай», «Чем больше молний, тем щедрее земля», «Грозы предвещают плодородие». Фантазии легенд и мудрость пословиц по сути оказались недалеко от истины. Грозы, как выясняется теперь, — действительно благо планеты, хранители ее биосферы.

На земном шаре одновременно бушуют около 1800 гроз. Суммарная сила их тока, заряжающего Землю отрицательным зарядом, доходит до 1000 А. Замечено — и не без причин, — что грозы тяготеют к заповедным местам, к лесам и горам с чистым воздухом. Они гораздо реже в крупных промышленных центрах. Геофизики объясняют это загрязненностью там атмосферы, заменой в ней легких природных аэроионов (творцов молний) тяжелыми, инертными. Потому-то вполне обоснованы опасения, что нарастающие индустриальные выбросы, отработанные газы автомобилей в конце концов изменят количество и характер гроз. Проблема изучается в глобальном масштабе по международным и национальным программам.

Почему электрофизическое явление происходит только в пору вегетации растений? Почему громы и молнии явно «предпочитают» сушу, а не море, выбирают небо над

джунглями и обходят стороной соседние пустыни? Их количество убывает от благодатных тропиков к ледовым полюсам примерно так же, как и продуктивность зеленого мира. Отсюда сам собой напрашивается вывод: в определенном смысле грозы являются следствием жизнедеятельности растений, ибо зеленый мир непрерывно выделяет в атмосферу летучие органические вещества, а в них содержится примерно столько энергии, сколько на земном шаре высвобождается за счет молний. Впрочем, пока это лишь предположение.

Наибольший вклад в электризацию атмосферы вносят не грозы, а облака и осадки. Облака бывают заряжены положительно в верхней части и отрицательно — в нижней, но могут иметь и противоположную полярность и преимущественный заряд одного знака. Грозовые облака несут постоянные электрические поля напряженностью до 200 кВ/м. Проходя над планетой, они создают на ее поверхности большие индукционные заряды, вследствие чего образуются как бы две обкладки еще одного природного конденсатора. Между ними возникает сильное электрическое поле. При пробое его полная сила тока, текущего на Землю от одного грозового облака, в средних широтах составляет десятую или сотую часть ампера, а ближе к экватору достигает уже одного ампера. Кстати, сила токов, текущих в самих этих облаках, в десятки, сотни раз больше. Менее активны облака слоистых форм. Зато они покрывают около половины земной поверхности и за счет этого также вносят существенный вклад в поддержание электрического поля Земли.

Атмосферные электрические процессы чрезвычайно непостоянны. Даже при спокойной погоде потенциал Земли может меняться в несколько раз по сравнению со средним значением, а перед грозой он увеличивается тысячекратно, иногда с переменной полярности. Или другой пример: в ненастную погоду при величине напряженности электрического поля у земной поверхности 500—1000 В/м часто наблюдается свечение острых предметов — так называемые огни святого Эльма. Причина явления? При таком высоком уровне электрополя заряды скапливаются на верхушках травы, деревьев, труб, мачт и др. Когда предмет попадает в поток заряженных капель, а в природе это случается в ненастную погоду, когда ветер создает горизонтальный поток воздуха и над землей несутся низкие облака, тогда-то с него и «стекает» разряд — начинается свечение.

Ученых давно интересует, а как же все, о чем мы рассказали, влияет на растения? Не могут же растительные организмы, сплошь состоящие из электрических зарядов, прошедшие все этапы эволюции в электромагнитных полях планеты, не реагировать на всевозможные перемены в электромагнитном состоянии атмосферы.

Это предположение подтвердили опыты, проведенные в фитотроне Института физиологии растений АН СССР. В первой серии экспериментов на растения от стабилизированного источника постоянного тока подавали отрицательные потенциалы, тем самым как бы увеличивали электрическое поле между обкладками гигантского конденсатора «Земля — атмосфера»: —500, —1000, —1500, —2000 и, наконец, —2500 В. И результат оказался поразительным: интенсивность фотосинтеза в листьях плавно возрастала! Во второй серии опытов на растения подавали положительный потенциал, т. е. заряд Земли как бы уменьшали, экранировали. В ответ на это интенсивность фотосинтеза снижалась тем сильнее, чем выше был приложенный заряд. Причем характерная деталь: и в том и в другом эксперименте потенциалы сначала выдерживали в течение 7,5 мин, потом экспозицию увеличивали до 1 ч. Однако характер уже знакомых вам зависимостей от этих манипуляций не менялся.

Итак, опыты схематически воспроизвели естественные электрические процессы, происходящие в земной атмосфере, и позволили обнаружить важный природный фактор. Заключается он в том, что естественная разница потенциалов между растениями и атмосферой оказывает сильное влияние на интенсивность фотосинтеза. Причины такого ответа растений на изменение величины электрического поля, конечно, носят глубинный характер, и выяснение их только начинается.

Заинтересовались ученые и точечными разрядами у растений, возникающими, когда силовые линии в электрическом поле концентрируются в одном месте. Обнаружилось, что вызывающие точечный разряд токи текут в растении не постоянно, а проходят положительными или отрицательными импульсами, причем они в постоянном электрическом поле формируются самим растением. Отмечено также, что чем больше радиус верхушки растения, тем выше разность потенциалов, при которой начинается разряд. При нормальных погодных условиях (не в грозу) растения, подверженные воздействию электрического поля «Земля — атмосфера», проводят очень малые величины

тока. И они опять же могут быть либо положительными, либо отрицательными в зависимости от погодных условий.

Следовательно, в приземном слое атмосферы — зоне обитания растений — существуют свои электрические законы, не всегда отвечающие глобальной полярности, определяемой отрицательным зарядом Земли и положительным — ионосферы. И эти законы еще совершенно не исследованы, они ждут своих открывателей.

В мире ионов

Воздействие атмосферного электричества на живые организмы связано и с наличием в приземном слое аэроионов — положительно и отрицательно заряженных атомов и молекул газов. Причем отрицательные ионы поднимаются вместе с капельками воды к положительно заряженной ионосфере, а по пути участвуют в образовании разнообразных облаков: обычных — на высоте до 10 км, перламутровых — на высоте 25—30 км и таинственных серебристых, плавающих на расстоянии 80—90 км от поверхности Земли. В свою очередь, положительные ионы притягиваются к отрицательно заряженной Земле, где их первыми встречают растения. Источниками ионов в нижних слоях атмосферы являются в основном космические лучи и радиоактивные излучения Земли, а также грозовые разряды, водопады и коронирующие провода ЛЭП. В 1 см³ воздуха у самой Земли обычно насчитывается до 750 положительных и 650 отрицательных аэроионов. И что примечательно, эта диспропорция возрастает летом, во время царствования флоры.

Случайно ли это? Нет, ведь растения «любят» положительные аэроионы, в отличие от человека, которому нужны легкие отрицательные ионы атмосферы. Крайне необходимый для фотосинтеза углекислый газ растения поглощают через свои устья только в виде иона со знаком плюс. Помогает им в этом отрицательный заряд верхушек стебля и листьев, обусловленный планетарным электрическим полем.

Положительные ионы имеют свой «нрав». Их очень мало, например, в помещении, потому что воздух, проходя через форточку, теряет половину этих частиц. Бóльшая часть даже попавших в помещение положительных аэроионов, подчиняясь законам электростатики, тут же оседает на стенах и различных предметах. Не это ли причина угнетенного состояния многих комнатных растений? Но стоит поместить в помещении сильно заряженный отрица-

тельный электрод — и к нему со всех сторон потянутся положительные аэроионы. Однако для этого не следует пытаться использовать аэроионизаторы, которые продаются в магазинах. Они рассчитаны на создание лучших условий для людей и образуют повышенную концентрацию не положительных, а отрицательных аэроионов.

Не зная законов электрофизики, люди сотни лет назад заметили, если поставить громоотвод среди деревьев, то они развиваются лучше. Теперь мы можем объяснить этот эффект. Громоотвод имеет отрицательный заряд, полученный им от Земли. Около него концентрируются аэроионы противоположного знака, которые и оказывают благотворное влияние на деревья.

Растения и сами умело приспособляются к тому, чтобы лучше контактировать с аэроионами за счет определенного расположения стеблей и листьев. Эти особенности удачно используют некоторые садоводы.

Эффект положительных аэроионов используется и для решения других практических задач. В Институте физиологии растений в стеллажах теплиц на грунт, изолированный от земли с помощью пленок, подавался отрицательный заряд в 100—120 В. По сравнению с контролем это позволило на 30—50 % увеличить сбор огурцов с каждого растения, а созревание наступило на 7—10 дней раньше обычного.

Что же под Землей?

До сих пор мы говорили о Земле, как о планете. Но коль нашими главными героями являются растения, то надо попытаться понять роль электричества и в субстрате, на котором они произрастают. Кстати, название нашей планеты произошло именно от земли в прямом, обыденном ее понимании (от общеславянского зем — пол, низ). Многие тысячелетия наши предки знали только ее, ибо она служила им местом обитания, источником пищи, воды и огня. И, согласитесь, обидно сознавать, что сейчас человечество успешно осваивает космическое пространство, посылает приборы за миллионы километров к Венере, Марсу, Меркурию, а в глубь Земли самая большая скважина пробурена всего-навсего на 12 км. Что делается дальше — одни догадки, да и тех не так-то много.

Не лучше обстоят дела и с изучением электрических свойств земной коры — верхней части планеты. Взять, к примеру, электрические разряды. Если в атмосфере их исследуют давно и успешно, то в литосфере как бы и не за-

мечают. А ведь логика подсказывает, что здесь имеются места с гораздо более высокими диэлектрическими свойствами, чем в атмосфере. Следовательно, электрические разряды тут должны происходить часто, с большей интенсивностью и с не менее серьезными последствиями для жизни на Земле.

Источников разрядов в недрах очень много. Причиной возникновения полей высокого напряжения могут быть электрические явления, связанные с ударом молнии в грунт, с индукцией при прохождении заряженного облака, с индукцией в естественном магнитном поле Земли. Кроме того, в земной поверхности могут идти различные механо-электрические процессы, скажем, преобразования в электроэнергию механических напряжений, возникающих при тектонических движениях и деформациях. Более того, образование любой трещины в диэлектрическом минерале всегда сопровождается разрывом электрических связей между частицами и, следовательно, появлением свободных зарядов. Зарядка пород и возникновение разности электрических потенциалов могут происходить и под воздействием радиоактивного излучения, которое постоянно идет во всей толще Земли.

Электричество рождается и в самом центре планеты. Предполагается, что из железного расплава ядра постоянно выделяется более легкий по удельному весу кремний. Его всплывание и является источником электромагнетизма. Впервые мысль о том, что течение электропроводящей жидкости аналогично движению проводника может вызвать возникновение магнитоэлектрического эффекта, высказана в начале нынешнего века применительно к Солнцу. Затем, уже в 1960-е годы, была построена так называемая кинематическая модель гидромагнитного динамо для Земли. Оказывается, очень высокое давление, при котором существует сверхплотная жидкость ядра, разрывает внутриатомные связи. Возникающие при этом мириады свободных электронов легко вовлекаются в движение, для которого не нужны провода. В результате рождаются электрический ток и его вечный спутник магнитное поле. Получается точь-в-точь как в динамомашине. Косвенным проявлением этих процессов ученые считают смещение магнитного поля Земли, о котором уже говорилось.

Все это — примеры источников масштабных электрических явлений. А сколько иных, локальных? Существуют фильтрационные поля и поля течения, связанные с движением воды в порах, диффузионно-адсорбционные поля, на-

блюдаемые на границах сред, и другие. При больших суточных колебаниях температуры и сухой почве амплитуды изменения потенциала в течение суток, например, достигают 400 мВ и больше, а это уже существенно для корневой системы растений.

Наконец, в почве находятся десятки химических элементов — носителей зарядов. Почему слипаются влажные частицы песка? Не задумывались? Ответ на вопрос дает изучение электрических взаимодействий между водой и твердыми частицами. Влажная песчинка на поверхности несет положительные и отрицательные ионы. Обычно они группируются парами, причем в каждой один из них расположен несколько дальше от поверхности, нежели другой. Таким образом, в разных местах одной и той же поверхности внешними оказываются ионы несхожего заряда. Они-то и создают электрическое поле в пространстве, окружающем песчинку. Если это так, то разноименные заряды соседних частиц, взаимно притягиваясь, упрочняют их связь. Наряду с этим электрические поля, создаваемые положительно заряженными участками поверхности песчинки, перераспределяют средние положения протонов в молекуле воды. В итоге ее текучесть снижается, затрудняется скольжение песчинок относительно друг друга.

Большой вклад в электрические взаимодействия в почве вносят свободные радикалы. Речь идет об активной форме вещества, обладающего неспаренными электронами, или, попросту, об «осколках» молекул. Возникновение их в минералах — закономерное следствие геохимических особенностей существования последних, точнее — длительного воздействия естественной радиоактивности, которая ведет к захвату или потере электрона обычными ионами и радикалами минералов.

Основные электрические характеристики самого верхнего слоя земли, в котором размещается корневая система растений, определяет почвенный раствор — поставщик элементов питания трав, кустов, деревьев. Он состоит из ионов разнообразных веществ, обладающих различными зарядами. Вот почему все электрокинетические явления — электроосмос, электрофорез, поляризация, частично дисперсионные эффекты при прохождении через почву переменного тока и др. — суть следствие именно ионной структуры почвенного раствора. Взаимодействия ионов и вызываемых ими электростатических полей в растворе с почвенными частицами и с корневой системой растений весьма сложные. Не случайно вычисление траектории движе-

ния какого-то одного иона требует применения ЭВМ! Но и при этом невозможно точно предсказать все его параметры. Не потому ли электрические свойства почвы, по сути, остаются «невспаханым полем»?

Впрочем, отдельные бороздки уже проложены. Известно, например, что частицы почвы (диаметром меньше 0,2 мкм), как органические (гумус), так и минеральные (глинистые), обладают свойствами коллоидов и несут электрический заряд, причем преимущественно с отрицательным знаком. Потому-то в почве сильнее выражено поглощение катионов, нежели анионов. Этим природа как бы подыгрывает земледельцам: коллоидные частицы, составляющие почвенно-поглощающий комплекс, «впитывают» из раствора такие важные для сельскохозяйственных культур питательные вещества, как аммоний, калий, кальций, магний, не дают воде вымывать их из почвы.

Имея отрицательный заряд, коллоидные частицы, находящиеся в почвенном растворе, отталкиваются друг от друга, что не дает им образовывать более крупные агрегаты, которые осаждались бы (выпадали) из раствора. Если же какую-то соль прибавить к суспензии коллоидных частиц, то они станут меньше поглощать положительно заряженные ионы. Кроме того, при добавлении соли сила взаимного отталкивания частиц уменьшится и они соединятся друг с другом — произойдет коагуляция, образуются микроструктурные агрегаты. Таково участие электрических сил в формировании агрономически ценной почвенной структуры.

На скорость коагуляции коллоидных частиц значительно влияет величина их электрического поля. С помощью электрооптических методов было доказано, что многие коллоиды, обладая свойствами диполей, имеют жесткий (постоянный) электрический момент большой величины — в тысячи и миллионы децибаев. В глинистых и гумусированных частицах эти силы обуславливают образование и существование соответствующих дисперсных структур. Кстати, те же свойства, как оказалось при проверке, лежат в основе улучшения физических свойств почв искусственными поверхностно-активными веществами: последние, являясь полиэлектролитами, как и многозарядные ионы, проявляют высокое коагулирующее действие при использовании даже в малых дозах.

«Черты» поглощающего комплекса присущи и корневой системе растения, ибо биокolloиды также несут электри-

ческий заряд и могут обменно поглощать ионы. Впервые на это обратил внимание крупный физиолог и микробиолог академик С. П. Костычев (1877—1931), а экспериментально доказал Д. А. Сабинин (1899—1951), основатель школы физиологии растений в нашей стране, со своими коллегами. Имеются исследования, свидетельствующие, что искусственное повышение отрицательного заряда корня усиливает поступление в него катионов из почвенного раствора. Это также создает возможность поиска путей практического применения знаний электрических свойств почв для повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

К сожалению, многое о почвенном электричестве остается еще не выясненным. Казалось бы, чего проще, например, измерить электропроводность почв? Ведь сам по себе данный метод не сложен и всесторонне отработан в физике и химии. Однако стоит в качестве объекта изучения взять почву, и все простое становится архитрудным. Электропроводность ее зависит от целого комплекса факторов: влажности, плотности, температуры, химико-минералогического и механического состава, структуры и совокупности свойств почвенного раствора. Чтобы оценить неординарность ситуации, достаточно привести несколько цифр. Если плотность почв различных типов меняется в 2—3 раза, теплопроводность — в 5—10, скорость распространения в них звуковых волн — в 10—12 раз, то электропроводность — даже для одной и той же почвы в зависимости от ее сиюминутного состояния — может изменяться в миллионы раз. Дело в том, что в ней, как в сложнейшем физико-химическом соединении, одновременно находятся элементы, обладающие резко несовпадающими электропроводящими свойствами, — металлы, диэлектрики, электролиты. Плюс к тому огромную роль играет биологическая деятельность в почве сотен видов организмов, начиная от микробов, червей и кончая целой гаммой растительных организмов.

Аналогичное положение с изучением характеристик и других электрических свойств почвы. И не только их, но и химических, и биологических, и физических. Все это, конечно, сдерживает поиск путей резкого повышения плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур. Кстати, не в полную меру используется и еще один огромный резерв — солнечная энергия.

Гимн Солнцу

Солнце — колоссальный источник энергии, дающий примерно 100 тыс. кВт в расчете на 1 м² поверхности светила. В минуту оно посылает на Землю столько же энергии, сколько вырабатывают за полтора года все электростанции нашей страны. Когда ученые начали понимать, каким фантастическим источником энергии является Солнце, они принялись соотносить ее и с кусками хлеба, и с лошадиной силой. Один физик в начале нынешнего столетия воскликнул: «Архимед при помощи рычага брался поднять мир. Я же утверждаю, что, концентрируя солнечную теплоту, можно получить силу, способную остановить Землю на ходу».

Из ядерной топки светила непрерывно излучаются потоки заряженных частиц — протонов и электронов, электромагнитные колебания различной длины волн. Все они способны производить биологические действия. Встречая живое, они отдают ему свою энергию, благодаря чему оно и существует.

Активность солнечного излучения непостоянна. Адекватно меняется погода и вся жизнь на планете.

Окончательно доказан одиннадцатилетний цикл активности нашего светила и связанные с ним атмосферные катаклизмы на Земле. Очередной такой пик предполагается в 1991—1992 гг. А вот периодичность вспышек на Солнце пока совершенно непонятна. Среди многих предположений высказано и такое: деятельность светила и биологические явления на нашей планете подчинены общему фактору — великой электромагнитной жизни Вселенной. И, возможно, она, имея свои периоды и ритмы, передает их с помощью единой электромагнитной связи.

Определенное влияние на характер геофизических явлений оказывают рентгеновские и коротковолновые излучения Солнца. Они вызывают распад и образование новых молекул и атомов верхней атмосферы, а также ее нагрев, что влечет за собой перемещение воздушных масс.

Велико воздействие солнечных лучей и непосредственно на организмы растений, животных. Многие ученые считают, что для численности бактерий определяющим является солнечная активность. Во всяком случае, в сравнении с влиянием температуры коэффициент корреляции между этими явлениями в 10 раз выше. Известно, что изменение солнечной активности сказывается на урожайности сельскохозяйственных культур, динамике выделения корнями растений органических веществ, приросте древесины.

Каковы же биофизические и биохимические механизмы этих эффектов? Ответ на вопрос пока не выходит за рамки гипотез, хотя и широко аргументированных, подтвержденных отдельными экспериментами. Основоположник гелиобиологии и аэроионификации советский биофизик А. Л. Чижевский (1897—1964), установивший зависимость между циклами активности Солнца и многими явлениями в биосфере, показал, что при этом в числе основных причин, влияющих на состояние биосферы, должны учитываться физические поля Земли и ее окружения. Многие другие исследователи, изучавшие проблему связи солнечная активность — биосфера, высказывали догадку, что в основе этой связи лежат электромагнитные поля. В настоящее время эта догадка получила научное обоснование.

Биофизик Б. М. Владимирский и его соавторы считают, что существует следующая схема механизма влияния солнечной активности на биологические явления: возмущение на Солнце → возмущение магнитосферы и плазмосферы Земли (магнитная буря с внезапным началом) → изменение спектра ЭМП на поверхности Земли → сдвиги в физиологических показателях организма (реакция на изменение внешней среды). Такая схема обладает универсальностью (потому и доказуема) — у большинства организмов обнаруживается чувствительность к изменениям уровня напряженности электромагнитных полей, которые обладают высокой проникающей способностью и присутствуют практически всюду. Они-то и делают главное дело — влияют на проницаемость биологических мембран, структуру и функции биологических коллоидов, химических соединений и даже воды. Но об этом — в одной из следующих глав.

Таким образом, под влиянием Солнца изменяются физиологические процессы в живых организмах. На них, в свою очередь, накладываются электромагнитные поля земного происхождения, другие физические факторы. Все это многообразие влияния внешней среды на жизнь зеленого растения сейчас активно изучается.

Это тем важнее, что перечисленные мощные факторы постоянно изменяются и иногда становятся вредными для живого организма. Такие нежелательные изменения пока неподвластны человеку. Но это не значит, что в целом уже сегодня нельзя управлять накоплением растительной массы, увеличивать ее на благо общества. Наряду с другими способами повышения урожайности сельскохозяйственных культур все чаще применяют обработку семян, растений и почвы электромагнитным полем.

Поле электрическое — полю хлебному

Вряд ли найдется в истории агрономии другой подобный вопрос, который решался бы в течение полутораста лет с таким переменным счастьем, как вопрос об электрокультуре.

Г. М. Рамнек

Крутые зигзаги истории

Земледелие после охоты и скотоводства — самая древняя профессия человека. Его зарождение относят к VI или V тысячелетию до нашей эры, когда первобытные люди Передней Азии стали собирать зерна не только для еды, но и для посева с целью вновь получить зерна. Казалось бы, что в процессе многовекового опыта человек определил все без исключения условия для нормального роста и развития растений, во всяком случае, роль света, тепла, влаги и почвы были оценены давно. Но подданные зеленого царства, как выяснилось, живут еще и в мире электричества. Не может быть, чтобы они были безразличны к нему!

Было проведено много опытов с целью обнаружения воздействия электричества на растения: научных и любительских, успешных и неудачных. Сначала (мы уже говорили об этом) возделывание растений с применением электричества получило название электрокультуры; в наше время чаще употребляют термины электростимуляция, электровоздействие, электрообработка. Вероятно, первый шаг к познанию этой проблемы сделал французский физик Ноллет (1700—1770). В 1747 г. он обнародовал результаты ряда обстоятельных по тем временам экспериментов. Побывавшие в электрическом поле семена прорастали скорее, выросшие из них растения лучше росли в высоту. Однако, как ученый объективный, он привел данные и об уменьшении массы фруктов и растений, находившихся под влиянием электричества.

Наряду с положительным отрицательное влияние электричества описал в 1783 г. аббат Бертелон (из Франции). По его мнению, оно приводило к задержке прорастания семян и роста листьев, цветов и плодов, препятствовало образованию «красящих» и «пахнущих» веществ. Объяснение таким неудачам можно найти, очевидно, в проведенных в те же годы опытах итальянца Гардини из Турина. В монастырском саду он «соткал» целую сеть из металлических проволок и нашел, что помещенные под ней растения развиваются хуже. Надо полагать, что отрицательный резуль-

тат в его экспериментах был связан с экранизацией растений от атмосферного электричества.

Подобные неудачи охладили пыл энтузиастов. Электрокультура пошла на спад. Новые и довольно многочисленные сообщения о ней появились лишь лет через сто, когда уровень оснащения ученых лабораторным оборудованием стал достаточно высок. Так, в одном из экспериментов того времени соорудили колпак из проволоки, или, как его уже тогда называли, фарадеевскую клетку, и поместили под него растения. Затем ввели туда электрод, с острия которого заряд стекал в атмосферу. Через десять суток кукуруза под колпаком выросла до 17 см, в обычных же условиях она достигала 8 см. Это уже был солидный успех.

С 80-х годов прошлого века исследователи перестали пользоваться фарадеевской клеткой, а принялись «сгущать» атмосферное электричество. Для чего, к примеру, в верхнюю часть виноградной лозы (до высоты 80 см) втыкали платиновые иглы с медными проволоками; от нижней части ствола аналогичные приспособления уходили в землю. За счет этого атмосферный электрический ток протекал через растение. В итоге в ягодах удваивалось количество глюкозы и уменьшалось содержание кислот, Количество зольных элементов снижалось в древесине, а в листьях, наоборот, увеличилось. Возможно, результаты именно этих опытов позволили французскому писателю А. Робиду (1848—1926), который наряду с Ж. Верном признан звездой первой величины в мире научной фантастики XIX в., прогнозировать электричеству великое будущее. В вышедшей в Париже в 1883 г. книге «Электрическая жизнь» он писал, что когда-нибудь для стимулирования роста всходов поля будут подвергать электрообработке. И оказался прав — это время близится.

Профессор физики из Финляндии Лемстром после поездки в северные полярные районы в 1904 г. пришел к выводу: быстрый рост растительности в течение короткого арктического лета зависит от особенностей электрических условий атмосферы в высоких широтах. И он имитирует эту ситуацию, для чего на высоте 50 см от земли располагает металлическую сетку, подает на нее высокое напряжение, а отрицательный полюс отводит в почву. Эффект превзошел все ожидания: рост полевых культур увеличился на 100, огородных — на 120 %. У земляники, находившейся в электрическом поле, созревание началось на 26-й день, в то время как на контрольных площадках — на 54-й. Лем-

стром установил также, что электричество действует тем лучше, чем плодороднее почва. Его метод, получивший затем название «разряд над головой», нашел широкое признание.

С 1914—1915 гг. английский ученый Блекман в течение многих лет ставил подобные эксперименты на Ротамстедской опытной станции. Сети проводов он развешивал на высоте 7 футов (210 см) над поверхностью почвы и подавал на них напряжение от 40 до 80 кВ. Отрицательный электрод углублял в почву. При этом сила тока, протекающего через сеть и почву, колебалась в пределах 0,5—1 мА. Электрическую обработку он осуществлял два раза в день по 3 ч в течение 20 дней.

Всего Блекман провел в те годы 27 мелкоделяночных полевых опытов с ячменем, овсом и яровой пшеницей. В четырнадцати из них было зафиксировано значительное увеличение сухого веса надземной массы этих культур (цифр автор не привел), в девяти прибавка превысила 30 %, в остальных четырех урожайность оказалась ниже контрольной на 10 %. В 1922 г. из семи полевых опытов с зерновыми, картофелем и капустой пять дали отрицательный результат, а из восьми опытов, в ходе которых растения выращивали в горшках, увеличение урожая массы зерна получили в пяти. В 1926 г. 73 % лабораторных опытов (в них напряжение меняли с 5 до 16 кВ) оказались неудачными.

При воспроизведении подобных экспериментов в США получены неудовлетворительные результаты. Восемь лет подряд там воздействовали электричеством на разные сельскохозяйственные культуры. И четко выраженного увеличения урожайности не наблюдали ни разу. Тогда было высказано предположение, что, возможно, не учли какие-то детали в оборудовании или что электрическая обработка оказала влияние на неизвестный пока фактор, лимитирующий рост в условиях проведенных экспериментов.

Позже американские ученые, анализируя неудачи, вспомнили об опытах Блекмана, в которых он экранировал вегетационные сосуды от естественных атмосферных токов и наблюдал при этом снижение роста растений на 5 %. Вот тут-то американские исследователи поняли, почему они не добились эффекта от электростимуляции растений. В местности, где они работали, часто проносились пыльные бури, а при них сильно возрастали величины атмосферного электричества. И, естественно, в таких условиях искусственная электрообработка на общем фоне просто терялась.

Многие ученые начала нашего столетия и в других странах отмечали, что летом электростимуляция не срабатывает, хотя в аналогичных опытах, проведенных зимой, почему-то результативность была высокой. Когда исследовали влияние электричества на проростки, то эффективность оказывалась неодинаковой даже в различное время суток. Все это еще раз свидетельствовало о значительном влиянии на жизнедеятельность растений естественного электрического фона атмосферы и о том, что нужны еще длительные изыскания для подбора оптимальных параметров электростимуляции.

Однако, несмотря на не очень утешительные итоги, Блекман и ученые его школы сделали значительный шаг вперед в развитии электрокультуры. Они доказали, что на эффективность электровоздействия сильно влияют погодные условия и время года, что лучше применять переменный ток, а не постоянный и что сила тока не должна превышать $0,1 \cdot 10^{-10}$ А (если она больше, то наносится вред растениям). Учитывая перспективность данного направления и для более глубокого изучения применения электричества в земледелии, при министерстве земледелия и рыболовства Англии в 1918 г. был организован специализированный электрокультурный комитет.

Этой проблемой усиленно занимались и во многих других странах. В одной канадской обзорной статье, опубликованной в 1960-е годы, отмечалось, что в конце минувшего столетия в условиях Арктики при электростимуляции ячменя наблюдали ускорение его роста на 37 %. Картофель, морковь, сельдерей давали урожай на 30—70 % выше обычного. Электростимуляция зерновых в полевых условиях подняла урожай на 45—55 %, малины — на 95 %. Однако такая же стимуляция капусты, табака, льна и турнепса давала отрицательные результаты. Опыты повторяли в различных климатических зонах от Финляндии до юга Франции. При обильном увлажнении и хорошем удобрении урожайность моркови вырастала на 125 %, гороха — на 75 %, сахаристость свеклы увеличилась на 15 %.

Настойчиво пробивала себе дорогу электрокультура и в России. Видный советский биолог, почетный член АН СССР И. В. Мичурин (1855—1935) пропускал ток определенной силы через почву, в которой выращивал сеянцы. И убедился: это ускоряло их рост и улучшало качество посадочного материала. Подытоживая свою работу, он писал: «Солидную помощь при выращивании новых сортов яблонь

дает введение в почву жидкого удобрения из птичьего помета в смеси с азотистыми и другими минеральными удобрениями, как, например, чилийская селитра и томасшлак. В особенности такое удобрение дает поразительные результаты, если подвергнуть гряды с растениями электризации, но при условии, чтобы напряжение тока не превышало бы двух вольт. Более высокого напряжения токи, по моим наблюдениям, скорее приносят вред в этом деле, чем пользу». И далее: «Особенно сильное действие к роскошному развитию молодых сеянцев винограда производит электризация гряд»⁴.

Многое сделал по совершенствованию способов электризации почвы и выяснению их результативности Г. М. Рамнек, о чем он рассказал в книге «Влияние электричества на почву», вышедшей в Киеве в 1911 г. Он погружал угольные, медные или платиновые электроды в почву на 8-10 см на расстоянии друг от друга в 4-7 см и подавал к ним различное напряжение, следя за изменениями в почве. При напряжении 3,8 В и силе тока 0,1 А растворимость фосфора увеличивалась на 49, калия — на 50,8 и извести — на 32 %. С увеличением времени электровоздействия улучшалось усвоение растениями и азота. Однако общее количество этого элемента в почве при напряжении 85—95 В сильно уменьшалось.

С разными культурами экспериментировал русский агроном Н. Н. Спешнев, электризовавший не только почву, но и приземный слой воздуха (для чего над участком натягивал металлическую сетку). Такое совместное воздействие повышало урожай ячменя и овса, увеличивало размеры корнеплодов редиса, моркови.

Оригинальный метод электрокультуры на рубеже XIX и XX вв. разработал Е. Пилсудский (его испытывали в Париже, в Полтавской губернии, в Петербургском ботаническом саду). Суть предложения заключалась в следующем. На противоположных концах поля в землю закладывали цинковые и железные листы так, чтобы в каждой соседней паре токи шли навстречу, а не в одном направлении. Проводники, соединяющие эти листы, размыкали еженедельно на 24 ч. Напряжение образующихся гальванических токов составляло 0,05—0,25 В (кстати, подобные эксперименты проводят и в наши дни).

В опытах Пилсудского урожайность свеклы повышалась втрое, содержание сахара в ее корнях увеличивалось

⁴ Мичурин И. В. Сочинения. М.: Сельхозгиз, 1948. Т. 1. С. 228, 249.

на 12 %. Эти результаты были удостоверены специалистами, официальными лицами и даже русским консулом в Париже. Интересные данные были получены на винограде. При выращивании его в условиях электрокультуры сильно развивалась корневая система, что помогало лозе противостоять тяжелому заболеванию, вызываемому насекомым филлоксерой. Улучшалось и качество вина, ибо в сусле было на 8—10 % больше сахара.

Впрочем, Пилсудский отмечал и некоторые негативные результаты практического использования своего метода. Так, в течение первых трех недель на экспериментальных делянках растения винограда чахли, хотя затем довольно быстро «приходили в себя». Хуже рос и картофель. Позже, уже в середине столетия, будет доказано, что отрицательный эффект при гальванизации почвы с применением цинковых пластин связан с повышением концентрации в почвенном растворе цинка.

Е. Пилсудский продолжал совершенствовать методику электростимуляции, рекомендуя ее при возделывании столь ценных растений, как свекла, виноград, фруктовые деревья, хлопок, чай, а также для оранжерей и парников. Он давал конкретные советы по устройству соответствующих приспособлений. В то же время ученый предупреждал практиков: «электрокультура не может иметь универсального значения. Так, например, в северных широтах хорошие результаты будут всегда случайными»⁵.

Электрокультура утверждалась все прочнее как новое направление агрономической науки. Но, к сожалению, наряду со специалистами в конце минувшего столетия и начале нынешнего электричество при возделывании самых разных сельскохозяйственных культур применяли многочисленные любители, а иногда и просто шарлатаны. Ведь дело-то на первый взгляд представлялось совершенно не сложным: навесил провода над грядкой или воткнул в нее два электрода и жди прибавки урожая. Русские сельскохозяйственные журналы и газеты того времени пестрели сообщениями о достижениях электрической культуры. Например, в 1890 г. в журнале «Сад и огород» появилась статья некоего Герасимова, который описал опыты неизвестного доктора Манети. Автор восторгался: корнеплоды редиса на электризованной грядке якобы достигали размеров редьки, имея в диаметре более двух вершков (9 см), оболочка у них была нежной, вкус приятный, лишенный

⁵ Пилсудский Е. Электрокультура растений по способу Е. Пилсудского // Электричество. 1902. № 21. С. 289—295.

свойственной редису едкой горечи. В то же время корнеплоды с другой гряды (контрольной) достигали в диаметре всего $1/2$ вершка (около 2 см) и были невкусны. Судя по всему, в этом, как во множестве других случаев, постановка экспериментов была несовершенной, результаты противоречивы, а их интерпретация — необъективной. Сообщения о двух-, трехкратном увеличении урожая при электризации были в то время обычными. Это порождало в народе легенды, веру в электричество как в панацею.

Но и в этот раз не долго торжествовала электрокультура. У многих ученых она начала вызывать недоверие. Академик Петербургской академии наук А. С. Фаминцин (1835—1918), повторив опыты доктора Манети с редисом и горохом, не обнаружил разницы между «электрической» и обыкновенной культурой. Некоторые специалисты-аграрники презрительно называли устройства для электровоздействия игрушками. Все чаще стали появляться резкие выступления против электрокультуры на страницах газет и журналов. Очередной бум ее начал утихать.

Позже, уже в 1930-е годы организатор электролаборатории в ТСХА Н. А. Артемьев, дав оценку прошедшему этапу развития электрокультуры в России и за рубежом, проанализировал допущенные ошибки. Он отмечал, что применявшаяся зачастую электризующую сетку иногда соединяли с проводом, проложенным в почве, что заземляло первую, и ток не мог попасть на растения. В случае использования атмосферного электричества сетка самозарядалась до потенциала, естественно имеющегося около нее, т. е. никакой разности потенциалов не было. Применявшееся напряжение сильно различалось — от сотен до десятков тысяч вольт, а силу тока измеряли далеко не всегда. Поэтому ряд опытов, в том числе и поставленные на Ротамстедской опытной станции в Англии, Н. А. Артемьев считал ошибочными.

С учетом прежних достижений и ошибок под руководством Артемьева был оборудован люменостат (что-то вроде современной климатической камеры). В нем регулировались параметры электровоздействия, света, температуры и даже откачивались ионы, которые в изобилии образовывались из молекул газов при высоких напряжениях. Все это делалось для достижения максимальной объективности исследований. Применяли в лаборатории переменный или выпрямленный постоянный ток в 20 — 30 кВ. Сетка, на которую подавали напряжение, имела размер 85х90 см и состояла из девяти натянутых проводков диаметром по

0,25 мм. Подвешивали ее в верхней части камеры на высоте 2,5 м от поверхности почвы. Обработку растений вели ежедневно с 8 до 11 ч утра и с 14 до 17 ч дня. И хотя собираемый урожай даже у одной и той же культуры в опытах был пестрым, тем не менее тенденция к повышению от электризации наблюдалась. К тому же в устьицах электризованных растений возрастало число крахмальных зерен, несущих энергетический материал для физиологических процессов. У красной гвоздики ускорялось цветение, и цветов было побольше, чем без электрообработки. Н. А. Артемьев и его сподвижники обнаружили вредное влияние на растения сильной ионизации атмосферы. Когда же концентрацию ионов уменьшили в 10 раз, урожай огурцов повысился вдвое. Словом, сотрудники лаборатории немного приподняли завесу над загадками электрокультуры.

Важный шаг вперед сделал один из основоположников гелиобиологии А. Л. Чижевский (1897—1964). В 1932 г. в подмосковном селе Кузьминки под его руководством начались исследования влияния электрического поля на семена овощей. Первые опыты были простыми: положительный электрод помещали под столом с подопытными семенами, а отрицательный был сверху — он притягивал к семенам положительные ионы. Для усиления эффекта верхний электрод делали в виде игольчатой «люстры» с торчащими во все стороны маленькими «громоотводами». Опыты оказались успешными. Если на семена огурцов воздействовали электричеством в течение 5—20 мин, их всхожесть возрастала на 14—16 %. К сожалению, война приостановила работы, начатые Чижевским. Лишь через 20 лет их с успехом продолжили в Челябинском институте механизации и электрификации сельского хозяйства.

Чуть раньше будущий профессор — электрофизиолог З. И. Журбицкий, выполняя в 1924 г. под руководством академика Д. Н. Прянишникова дипломную работу по минеральному питанию растений, заметил: на этот процесс влияет атмосферное электричество. Затем догадка ученого была подтверждена многочисленными экспериментами. В частности, при обычном положительном потенциале атмосферы (130 В/м) растения усваивали азота и фосфора в 1,3 раза больше, чем калия, а при отрицательном потенциале атмосферы (500 В/м) азота и фосфора ими было «впитано» в 2,5 раза меньше. В других исследованиях было выявлено, что при увеличении разности потенциалов атмосферы у растений усиливается процесс поглощения элементов питания из почвы и углекислого газа из возду-

ха. Все это положительно сказывалось на урожайности. Так, в опытах, проведенных в Институте физиологии растений АН СССР, при увеличении разности потенциалов между растениями и атмосферой на 90 В урожай овса повышался на 51 %, ячменя — на 42, огурцов — на 29, зеленой массы кукурузы — на 35 %. Когда же растения «прикрывали» от атмосферного электричества металлической сеткой, то их рост при прочих равных условиях замедлялся почти наполовину. На изолированных растениях кукурузы средняя масса початков уменьшалась на 83 %.

В послевоенные годы бурно развивалась молекулярная биология, родилась мембранология, значительно больше стало известно о внутриклеточных электрических взаимодействиях. Одновременно освоение космоса позволило расширить знания об ионосфере, магнитосфере, электрической системе планеты. Все это породило еще более глубокий интерес ученых к электрокультуре. Теперь исследования в этой области ведутся на современном уровне: выясняется влияние внешнего электрического поля на межмолекулярные связи, на физиологические и биохимические процессы в растительном организме. Однако те ранние, несколько наивные по нынешним меркам эксперименты не исчезли бесследно. Добытые в них данные ложатся в основу новых опытов, в основу разрабатываемых электротехнологий сельскохозяйственного производства.

Электростимуляция биосистем

Ученик спрашивает Учителя: «Почему наука все время что-то открывает, а непонятого становится все больше и больше?» Учитель отвечает: «Представь себе, что мы находимся внутри окружности, отделяющей Известное от Неизвестного. Все, что внутри окружности, уже исследовано и понято наукой, все, что за пределами круга, пока еще непонятно нам. Наука делает свое дело, наш круг знаний становится все больше и больше, при этом, естественно, растягивается окружность-граница — чем больше мы узнаем, тем больше неизвестного, непонятого, нам открывается».

Это, конечно, не более чем образ. Но, согласитесь, интересно представить себе, как небольшой, скажем, метровых размеров расширяющийся круг знаний Гальвани и его современников ныне превратился в километровую окружность. И как маленькие, буквально сантиметровые участки граничной дуги — «животного электричества» —

стали сегодня огромными научными фронтами: «Электрофизиология человека», «Электрофизиология животных», «Электрофизиология рыб», «Электроэкология», «Магнитобиология», «Электрофизиология растений» и т. д. Их и специалист не всегда в состоянии охватить единым взглядом!

И все-таки о воздействии электричества на живой организм, тем более о механизме этого процесса мы знаем крайне мало. Настолько мало, что пока не можем объяснить абсолютного большинства наблюдаемых биологических эффектов электричества и магнетизма и вынуждены называть их феноменами. Что за информация закодирована в электрическом сигнале? Почему молекулы и клетки изменяют свое поведение, реагируя на изменение электромагнитного окружения? Почему электровоздействие не всегда благоприятно для организма? И еще много, много «почему».

Всю свою жизнь организм постоянно приспосабливается к непрерывно меняющимся условиям внешней и внутренней среды. Так, растению вовсе не безразличны и колебания напряженности электромагнитного поля, связанные с солнечной активностью, и перемены электрических характеристик атмосферы, зависящие от метеорологических условий, и «скачки» электромагнитного фона вблизи линий электропередачи, радиостанций, телецентров и т. д. Доказано, что все эти чисто физические факторы обладают биологической активностью.

Однако, несмотря на непрерывно происходящие и порой довольно существенные изменения во внешней среде, в том числе и в электромагнитной обстановке, в организме во имя его существования поддерживается относительное динамическое постоянство состава и свойств внутренней среды, или так называемый гомеостаз. Выработалась такая способность в ходе эволюции. И, надо признать, эта мощная биологическая защита зачастую надежнее предохраняет организм от гибели, нежели механическая.

Чтобы осуществлять электростимуляцию растения, тем более слабыми электромагнитными силами, надо очень хорошо понимать систему приспособительных реакций организма, иначе, «пробиваясь» через биологический «щит» в стремлении направить особь на интенсивное развитие, мы можем повредить живое. Соблюсти это условие непросто, особенно при нынешнем уровне наших знаний о живой материи. Нет еще и теории электростимуляции. Поэтому и Результаты соответствующих опытов непредсказуемы, а то

и необъяснимы. Да и сама электрофизиология растений, как и всякая зарождающаяся наука, пока не имеет прочных основ. Каждый исследователь вправе интерпретировать ее по-своему, каждый при желании может усомниться в данных оппонента. Словом, ничего устоявшегося в этой отрасли знаний сейчас не существует.

Тем не менее факт остается фактом: эффект электростимуляции живых организмов реален. Все непонятное, таинственное будит воображение, побуждает человека искать ответ на возникающие вопросы. Дальше всех в этом продвинулись медики, они успешно применяют электротерапию. В их арсенале и электрофорез лекарственными препаратами, и электродуш, и электропунктура, и сращивание костей при помощи электричества, и иглотерапия (эффект укалывания в последнее время прямо связывают с электрохимическими явлениями, возникающими при введении в кожу игл), и многое другое.

Наш современник, американский электрохимик Арт Пилла умело формирует и «тонко настраивает» электромагнитные импульсы, используя их в терапии. «В любой изучаемой живой системе, — пишет он, — мы обнаружили, что, для того чтобы управлять клетками, нужны одни и те же по величине токи. Но если их амплитуда и частота не соответствуют определенным параметрам, клетки не откликаются. И только настройка сигнала на так называемую биологическую полосу пропускания вызывает желательную реакцию. Электрический сигнал заставляет двигаться ионы натрия, магния, кальция через клеточную мембрану, это, в свою очередь, влияет на ход химических реакций внутри самой клетки и в конце концов может привести к упорядочению ДНК — первому шагу роста и восстановления» [Техника — молодежи. 1981. № 8. С. 44—47].

Пилла убежден, электричество — самое эффективное средство управления бесчисленными процессами в организме. Обнаружено, что импульсы одной величины ускоряют регенерацию конечности у саламандры, а другой — рост новой ткани. Интересно воздействие электричества на раковые клетки — оно их разрушает. Электромагнитные поля способны влиять на функции мозга. Доказано, повысить скорость обучения, запоминания у приматов и кошек можно, облучая их головы радиочастотным электромагнитным полем с модулированной амплитудой. Высказано предположение, что если введение в медицинскую практику в начале столетия вакцин, а затем антибиотиков резко повысило

эффективность лечения оспы, туберкулеза, других инфекционных заболеваний, то с помощью электричества рано или поздно будет совершен переворот в лечении хронических болезней, в исправлении физических недостатков, которые ныне считают безнадежными.

Эти мысли американского журналиста Кэтлина Олифа были в середине 1980-х годов опубликованы в одном из советских журналов. Не разделяя полностью оптимизма автора, поверим все-таки, читатель, в большое будущее электробиологии. Уже сейчас она творит чудеса в медицине, а завтра, ну, пусть послезавтра, придет ее черед и в земледелии. Правда, в этом вопросе слишком много еще неясного. И нечего тому удивляться. Когда-то и то, что соломинка притягивается к янтарию, натертому о меховую одежду пастуха, тоже представлялось тайной. И факт этот почитали за настоящее чудо.

Разумеется, если подходить к делу с таким мериллом, то нам теперь полегче: о биологических эффектах электричества уже кое-что известно, в том числе благодаря растениям. Мы, например, знаем, что практически весь их организм состоит из заряженных частиц, начиная от всемогущей ДНК и кончая верхушкой листа и кончиком корня, что растение удивительно изящно использует энергию световой волны и само производит ток, что оно, наконец, владеет своеобразным электрическим «языком». Если взглянуть на электрическую схему растения, то не возникнет и тени сомнения: оно представляет собой сложнейшее электронно-ионное устройство. К сожалению, основополагающие принципы работы этого устройства и пути регулирования его внешними электромагнитными силами — «сие тайна велика есть».

О том, насколько сложны возникающие при электровоздействии изменения в клеточном метаболизме, можно судить по электрофорезу — движению частиц, находящихся во взвешенном состоянии в жидкой или газообразной среде, под действием внешнего электрического поля. Этот метод применяют в том числе для разделения биологических макромолекул, когда есть необходимость выделить отдельные биологически активные фракции белков, например, для использования их в селекции и биотехнологии. Почему так происходит?

Благодаря наличию электростатических сил между заряженными группами коллоидных частиц и ионами растворителя образуется диффузное облако ионов с зарядом, про-

твиположным тому, которым обладают сами частицы. Возникновение ионной атмосферы вокруг каждой частицы так или иначе, но меняет ее электрофоретическую подвижность. И на то есть три причины.

Во-первых, из-за уменьшения эффективности электростатического заряда потенциал на поверхности частицы снижается. Во-вторых, поскольку знак заряда ионного облака не совпадает со знаком заряда частицы, облако смещается в направлении, противоположном миграции частицы, замедляя тем самым ее движение. В-третьих, наблюдается замедляющий эффект другого рода, связанный с тем, что в электрическом поле одни ионы при перемещении приближаются к частице, а другие удаляются от нее. Вследствие чего в ионной атмосфере идет непрерывное замещение ионов, что нарушает ее сферически симметричную форму, так как входящим ионам требуется время на «поиск» своего места во внешнем поле и в поле макромолекулы, чтобы прийти в равновесие с ее окружением. Все это невероятно усложняет поведение биологических зарядов в электрическом поле. Физики для определения движения всего-навсего одной заряженной частицы в проводящем растворе вывели уравнение, решаемое с помощью ЭВМ. Однако даже оно не дает полного представления о поведении заряженной макромолекулы клетки в электрическом поле, ибо в нем пока невозможно учесть силы, определяющие движение молекул в соответствии с физиологическими потребностями организма, гравитационные силы и целый ряд других факторов, присущих взаимодействию частиц в живой растительной клетке.

Как же в таком случае разобраться с механизмами ответа растительного организма на внешнее электромагнитное воздействие? Здесь дело обстоит во сто крат сложнее описанных выше примеров. В процессе эволюции живые организмы выработали чрезвычайно совершенные, зачастую находящиеся на пределе разрешенных законами физики возможностей механизмы ответных реакций на изменение факторов внешней среды. Характерной их чертой является способность избирательно реагировать на самые различные параметры раздражителей, а именно амплитуду, частоту, «код» сигнала и др. Поэтому вопрос о наличии и характере избирательной чувствительности живых объектов к электромагнитным полям является одним из основных в современной электромагнитобиологии.

Выяснено, что начальной стадией восприятия действия раздражителей любой физической природы являются вы-

званные ими так называемые конформационные переходы специфических белков — рецепторов, т. е. они меняют только свои геометрические формы без изменения химических связей. Но этого достаточно, чтобы сработало биологическое усиление действия электромагнитных полей. Это очень важный момент, свидетельствующий о том, что энергия внешнего воздействия за счет работы биологических усилителей может быть на много порядков меньше, нежели ответная реакция организма. Следовательно, можно добиться стимулирования тех или иных процессов в растении очень слабыми электромагнитными полями, что сейчас находит все более широкое распространение среди экспериментов в этой области.

В этой связи нельзя не коснуться вопроса о «митогенетическом излучении» растительных клеток, обнаруженном А. Г. Гурвичем в 1923 г. Он высказал идею о «молекулярных констелляциях», распад которых связан с очень слабым излучением самих клеток. «Молекулярные констелляции», по Гурвичу, состоят из возбужденных молекул и, подчиняясь влиянию гипотетического «морфогенетического поля», образуют устойчивую структуру, которую можно сравнить, например, с колонной физкультурников или балетным ансамблем в противоположность «устойчиво равновесному» кристаллу или архитектурному ансамблю. Открытие Гурвича, по мнению В. В. Парина, — одно из крупнейших достижений советской теоретической биологии, и сам факт существования излучения, подтвержденный неоднократно в работах отечественных и зарубежных исследователей, является важным научным открытием.

Проблема биологического усиления, в том числе и усиления сверхслабых ультрафиолетовых излучений, открытых А. Г. Гурвичем, теснейшим образом связана со способностью биологических систем избирательно реагировать на определенные параметры электромагнитного поля. Она может сыграть решающую роль в развитии идей электростимуляции растений.

Другой важной особенностью реакции организма на внешнее воздействие является то, что любые раздражения переводятся клеткой на универсальный язык изменений мембранных потенциалов. Величина этих изменений определяет переключение тех или иных процессов в клетке. Клетка переводит любую информацию сначала на электрический, а затем химический язык.

Исключительны свойства воды, ионов кальция, фосфора и других элементов в реализации внешних сигналов.

Они также сильно реагируют на слабые электромагнитные поля и способны перестроить работу клетки и всего организма в ответ на раздражение. Так, слабые физические воздействия изменяют гидратацию ионов, а это сказывается на взаимодействии других молекул в водной среде, на регуляторной системе мембран и, наконец, на всей сложной системе управления метаболизмом в клетке. В итоге изменяется состояние организма.

Действие электромагнитных полей на растительный организм очень многообразно. Они могут оказывать влияние на мембранный потенциал, а через концентрацию протонов, например, на электрохимические процессы в клетке, на работу ферментных систем, непосредственно на различные биологические структуры и т. д.

Или вот физиологически активные вещества (ауксин, гиббереллин, всевозможные ферменты), которые регулируют рост растений, дифференциацию их органов, словом, являются главными действующими «лицами» большинства биологических процессов. Они не локализованы в каких-то определенных «точках», а направляются туда, где в данный момент организм испытывает в них наибольшую нужду. Это перемещение «подстегивается» или, наоборот, тормозится электрическим полем. Например, если ток пропускать от основания к верхушке стебелька, то проросток овса оказывается в 12 раз восприимчивей к гормону роста ауксину, чем при обратном направлении тока. Значит, в первом случае активность ауксина возрастает, он концентрируется в верхушке и росток «вытягивается» быстрее.

Интересные результаты были получены и при воздействии электричеством на корневую систему, когда корень лука помещали в сильное поле. Причем тогда, когда к кончику корня подводили отрицательный электрод, наблюдалось слабое торможение роста. Стоило изменить направление тока и кончику корня попасть в зону влияния положительного электрода, как рост полностью тормозился. Если при этом ток пропускали довольно долго (около 1,5 ч), то подопытное растение получало повреждения и даже гибло.

В других исследованиях, когда применяли поле напряженностью от 5 до 70 В/м, кончик корня, имеющий положительный заряд, всегда реагировал отрицательно на приближение к нему положительного электрода. Почему? Было высказано предположение, что последний способствует накоплению в кончике корня ауксина — индолилуксусной кислоты, от природы наделенной отрицательным зарядом. Данный гормон, как известно, в большой концентрации

тормозит рост корня. К сожалению, в ходе этого эксперимента не определяли содержания ауксина, и, следовательно, данное предположение требует точного подтверждения.

Восприятие живым растением внешних электрических воздействий в основном определяется электрическими параметрами самого обрабатываемого организма. К ним следует отнести его диэлектрическую проницаемость, диэлектрические потери, удельное поверхностное и объемное сопротивление, активное сопротивление отдельных тканей, органов и др. Они, в свою очередь, зависят от состояния организма, активности метаболизма в данный период и совокупности внешних факторов. Все это учесть в одном эксперименте практически невозможно, поэтому получаемые результаты зачастую трудно интерпретировать.

Наиболее адекватный (по нынешним понятиям) ответ растения на электровоздействие — изменение биоэлектрических потенциалов (такая реакция свидетельствует о степени активности основных жизненных процессов в организме). И это вполне объяснимо. При искусственном электрическом воздействии растение получает дозы энергии, значительно превосходящие те, которые оно воспринимает от естественного фона. В результате в нем возникают как первичные, так и вторичные эффекты. Первые проявляются в период непосредственного действия внешних электрических сил и прекращаются со снятием таковых. Но не исчезают совсем, а дают начало вторичным эффектам. Это происходит потому, что в результате электрической обработки возбуждение молекулы в живом организме, как правило, передается соседним молекулам. В итоге при благоприятных параметрах электровоздействия усиливается рост растений, газообмен, поглощение ими минеральных веществ, накопление биологически ценных ассимилятов — продуктов, которые затем используются как продовольственное или техническое сырье.

И, как всегда, в центре таких событий находится растительная клетка, которая тонко реагирует на всякое изменение среды, в том числе и на внешнее электромагнитное поле. Сотрудники Центральной генетической лаборатории им. И. В. Мичурина воздействовали на семена гороха и кормовых бобов переменным электрическим током плотностью $0,28 \text{ мА/см}^2$ в течение 6—10 мин. И их клетки тут же ответили целой гаммой изменений: под влиянием переменного тока в них повысилась вязкость протоплазмы, усилилась ее проницаемость, произошел сдвиг реакции среды в щелочную сторону, повысилась активность фер-

ментов пероксидазы и полифенолоксидазы, снизилось содержание сухих веществ. Более длительная электрообработка (свыше часа) привела к угнетению клеточных процессов.

В опыте с семенами кукурузы, воздействие переменным током в течение 15 мин дало несколько иные результаты: в проростках уменьшилась концентрация водородных ионов и интенсивность дыхания, ускорилось гидролитическое разложение запасных веществ. При экспозиции около часа уровень рН также снижался, одновременно усилились окислительно-восстановительные процессы, повысилось содержание сахаров.

В другом исследовании предпосевное воздействие на семя ячменя постоянным током повышало в них количество свободной и снижало количество связанной воды.

Весьма показательны опыты, поставленные в Кубанском сельскохозяйственном институте. Здесь применяли несколько режимов электрообработки семян овощного гороха. Лучшим оказался вариант с использованием переменного электрического поля напряженностью 2,5 кВ/см в течение 10 мин. На столь мощное раздражение семена откликнулись ускоренным разложением структуры крахмала с выделением неорганического фосфата, уменьшением фракции амилопектина, увеличением содержания ди- и моносахаридов. Усилился в них и процесс поглощения воды. Все это обусловило преждевременное по сравнению с контрольными семенами прорастание.

Электромагнитное поле сказывается и на ускорении прохождения фаз развития клетки. Это наблюдали молдавские ученые Д. А. Выродов и А. А. Жученко, поместившие корешки томата в электрическое поле напряженностью 5 кВ/см. Они убедились: постоянный ток содействует ускорению, а переменный замедляет митотическую активность клеток.

Однако для всего есть пределы. Не составляет исключения и электровоздействие на растения. В одном из опытов корни кресс-салата поместили в горизонтальное электрическое поле высокой напряженности — от 3000 до 4000 В/см. И всего через 8 ч клетки оказались накануне гибели. В электронном микроскопе было видно явное нарушение полярности в них. Органеллы были бессистемно разбросаны. Особенно пострадали эндоплазматические ретикулы — структуры, представляющие собой разветвленную сеть канальцев, более или менее равномерно пронизывающих всю цитоплазму клеток. В сильном электрическом по-

де нижняя часть ретикулума совершенно исчезла, остальная часть была беспорядочно разбросана и во многих местах порвана. По сравнению с контролем общая площадь эндоплазматического ретикулума удвоилась, Видимо, клетка, борясь за существование, начала ускоренно укреплять свой главный бастион. Но это ее не спасло.

Описанные и подобные им биохимические и цитоплазматические изменения в клетке при электровоздействии многие ученые связывают прежде всего с ее электрическими «воротами» — с мембранами. Их работа, выполнение ими главных функций — пропускать или не пропускать внутрь клетки то или иное вещество, обеспечивается ионными насосами. Эти рабочие ионы, имея положительный или отрицательный заряд, все время перемещаются через мембрану в ту или иную сторону. Они могут первыми подвергаться атакам электрических волн, причем сильнее, когда находятся вне клетки, ибо обладающая большим сопротивлением мембрана сама по себе является надежным препятствием электричеству.

Более того, сильной стороной взаимодействия любого вида излучений в живой (кстати, и в неживой) природе является ионизация, т. е. нейтральный атом, или молекула, или их группы становятся электрически заряженными в результате потери или присоединения электронов под влиянием электромагнитных волн. Массовое появление новых ионов и электронов внесло бы неразбериху в любую электрическую систему, особенно в такую тонкую и организованную, как мембрана. Добавим, что при облучении биологического объекта на первый план выдвигается так называемый радиолиз воды, протекающий с образованием свободных радикалов ОН, атомов кислорода и водорода. Все они активно вступают в реакцию друг с другом и с молекулами воды, образуя перекись водорода. Активность ионизированной воды сильно сказывается и на любом растворенном в ней веществе, способствует перегруппировке молекул. В результате меняется число и размеры различных атомно-молекулярных комплексов, происходит мгновенное изменение биогенных ионов, например кальция, усиливается проницаемость мембран. Внешнее электрическое поле может заставить электрогенные ионы сильнее отклоняться от мембраны, перераспределяться у ее поверхности и т. д.

Такие изменения незамедлительно сказываются не только на функциях клетки, но и организма в целом. Можно считать доказанным влияние электрических факто-

ров на анатомическое строение некоторых видов растений их дыхание, рост и развитие. Накоплен немалый материал, раскрывающий изменения в так называемом дальнец транспорте ионов, т. е. в перемещении элементов питания от корня к местам участия их в синтезе и других процессах. Однако в таких опытах использовали довольно высокие напряжения, в десятки и сотни раз превышающие величины естественных электрических градиентов растения.

В последнее время для стимуляции растений стали применять напряжения внешнего поля, близкие к естественным величинам. Так, в одном эксперименте к кончикам корня и стебелька кукурузы подавали напряжение величиной всего лишь от 50 до 200 мВ. Подводили его непрерывно 48 ч. В том случае, когда прикладываемая к проростку разность потенциалов внешнего источника тока составляла 50 мВ, рост в длину надземной части не изменялся, а у корневой системы усиливался на 21 %. Примерно схоже вел себя проросток, когда к нему подвели 150 мВ. А вот другая закономерность: когда к верхушке присоединяли катод, то усиливался рост корней, а при подведении анода то же самое делал стебелек. И еще один факт. Если разность потенциала мала, то при подаче тока в проростках значительно увеличилось накопление общего азота, фосфора, калия и кальция. Поскольку ионы этих элементов имеют разный заряд, то получается, что при любом направлении тока (и сверху вниз, и снизу вверх) одинаково стимулировалось поступление в растение как анионов, так и катионов. Это противоречит устоявшемуся мнению — все дело во взаимном притягивании разноименных зарядов. Выходит же, надо искать другую причину активизации поглощения ионов корнями. Вместе с тем когда экспериментаторы проанализировали содержание элементов только в надземной части, то общепринятый взгляд подтвердился: при положительном электроде на верхушке в растения лучше поступали анионы, при отрицательном — катионы.

Чтобы окончательно не запутаться в том, куда и как течет ток, давайте зададимся вопросом: а где же в растении находятся его пути и ведомы ли они? Ответ прост: точно неведомы, хотя логических и экспериментальных доказательств вроде бы достаточно. К примеру, установлено: генерируемые самим растением биопотенциалы передаются по проводящим пучкам, т. е. по специализированным тканям, по которым идет транспорт питательных веществ, воды, ассимилятов. Таких тканей две — ксилема и флоэма. Очевидно, главную роль в проведении биопотенциалов иг-

рает флоэма — по ней из листьев вниз перемещаются сахара, образованные в процессе фотосинтеза. Однако выделенные из стебля проводящие пучки (живые, разумеется) неспособны генерировать потенциалы действия. Значит, сам по себе пучок недостаточен для «производства» распространяющихся по растению электрических импульсов. Пришлось ученым делать заключение: потенциал действия складывается из кооперативного взаимодействия возбудимых элементов со всей или большей частью тканей стебля.

Вот так — весь стебель может проводить ток! Вот и пойми, где же пойдет тот ток, который мы подводим извне? Есть сведения, что он не обязательно протекает в одном направлении. Судите сами: в живой ткани присутствуют многочисленные ионы, при появлении внешнего поля перемещаются в разные стороны (положительные — к катоду, отрицательные — к аноду). Следовательно, имеются уже два потока. Кроме того, в цепи, замкнутой через растение, электроны движутся от отрицательного к положительному электроду. При этом они сталкиваются с ионами. Все эти транспортные артерии зарядов в растении предстоит уточнять, чтобы выработать оптимальные способы и режимы электровоздействия.

Электротропизм

Так уж сложилась судьба растений, что они ведут «сидячий» образ жизни. Другое дело — животные: им доступно передвижение, необходимое прежде всего для поиска пищи. Ведь они нуждаются в готовом «питании», их называют гетеротрофами. Растения же — автотрофы, т. е. обеспечивают себя пищей самостоятельно. Причем для этого у них все «под рукой»: углекислый газ — в окружающем воздухе, вода — в почве, там же — минеральные элементы питания. А если питательные вещества не рядом, если чуть левее или правее от корня, что же ему оставаться «голодным»? В этих случаях выручает способность корня двигаться в ту или иную сторону, что и называют тропизмом.

Различают: геотропизм — реакция на одностороннее воздействие силы тяжести; фототропизм (он в основном характерен для листьев, цветков) — реакция на воздействие света; магнитотропизм — например, усиленный рост корней, ориентированных в направлении Южного полюса Земли или искусственного магнита, и др.

Все виды тропизмов так или иначе связаны с электрическими явлениями. Понимание этого имеет давнюю и любопытную историю, богатую и важными открытиями, и крупными ошибками, и длительными, по крайней мере более чем полувековыми, дискуссиями ученых.

Большой вклад в развитие электрофизиологии растений и, в частности, в изучение взаимосвязи электрических явлений и тропизмов внес академик АН СССР Н. Г. Холодный (1882—1953). Наиболее широкое признание получили его труды в области ботаники и микробиологии, а также созданная им (почти одновременно с американцем Ф. В. Вентом) теория гормональной природы тропизмов.

Электрофизиологией растений Холодный впервые занялся в трудное для России время, 1914—1915 гг. И уже тогда он получил экспериментальный материал, вплотную приблизивший его к выявлению геоэлектрического эффекта (изменение электрических характеристик растительных тканей при геотропизме). Кстати, автором открытия этого эффекта считается немецкий ученый Браунер, который описал его пятнадцатью годами позже.

В те же годы в Саратове, куда в связи с военными действиями был эвакуирован Киевский университет, воспользовавшись тем, что городская электростанция давала постоянный ток, Холодный занялся изучением катафореза (это устаревшее название электрофореза) одноклеточных зеленых водорослей и дрожжей. И вновь удача: он установил, что знак и величина заряда на поверхности клеток зависят от их возраста и физиологического состояния. К сожалению, все эти данные тогда не удалось опубликовать, а часть из них была утеряна. Но главные работы исследователя были еще впереди.

В начале 1930-х годов, проанализировав данные многочисленных изысканий в области электрофизиологии растительного организма, Н. Г. Холодный убедился: среди них почти вовсе не было сведений о связях биоэлектрических явлений с ростом, а если такие и были, то с крайне противоречивыми результатами. Вот что он писал по этому поводу: «... выводы отдельных авторов в области электрофизиологии роста очень расходятся даже в вопросах чисто экспериментального характера. Методы, примененные некоторыми исследователями, не всегда были безупречны с физической и физиологической точек зрения. Очевидно, в этой области исследований мы еще не вышли и, возможно, не скоро выйдем из стадии предварительного собирания

фактических данных, касающихся связи известных электрофизиологических явлений с ростом растительных органов. Но такая предварительная работа решительно необходима»⁶.

Н. Г. Холодный широко развернул эту работу, усовершенствовал приборы, методику исследований, получил интересные результаты. Он определил, например, что если через изолированный проросток овса от основания к верхушке пропускать ток силой от 10^{-7} до 10^{-6} А, то рост заметно ускоряется. Ток такой же силы, но направленный в противоположную сторону, этого эффекта не вызывает, наоборот, рост часто тормозится. Мимо внимания экспериментатора не прошло и то, что ускорение роста длится очень короткое время и к тому же наблюдается непосредственно после включения тока. В некоторых случаях, когда начальный прирост по каким-то причинам был слишком мал, электрический ток как бы стимулировал его до нормального уровня.

Из, казалось бы, простых опытов ученый сделал далеко идущий вывод: электрический ток влияет не непосредственно на движение «ростового гормона как электролита», а через сложную систему «живой протоплазмы». Тем самым он опроверг мнение ряда крупных западных ученых, которые доказывали непосредственную связь ауксина с электрическими явлениями. Н. Г. Холодный увязал наблюдавшиеся им явления с движениями тропических растений и на этой основе развил ставшую классической гормональную теорию тропизма.

В результате этого открытия стало яснее и другое свойство растений — электротропизм (движение органов, вызываемое непосредственно электрическими зарядами). Еще в первых опытах по электровоздействию на корневую систему было подмечено, что корни отклоняются то к одному, то к другому полюсу (электроду). Правда, в последние годы в литературе все чаще появляются сообщения о том, что корень искривляется в сторону отрицательного полюса. Тем не менее некоторые исследователи этого явления не обнаруживают, а потому не признают.

По этой причине до сих пор возможность вызвать у растений направленные движения с помощью электрического тока именуют феноменом. Однако электротропизм растений реально существует. Чтобы его вызвать, сила тока должна быть очень небольшой. В этой «тонкости» —

⁶ Холодный Н. Г. Избранные труды. Киев, 1956. Т. 1. С. 361.

одна из причин того, что нет однозначного понимания, навстречу какому полюсу изгибается корешок.

Сложностей с обнаружением этого вида тропизма действительно много. Когда пытаются продемонстрировать его в почве или в искусственном питательном растворе, то там, как правило, у электродов происходит поляризация ионов, и корень может уйти в противоположную от отрицательного полюса сторону. Но может проявиться более изученное явление — хемотропизм (движение корня в сторону какого-либо химического вещества или от него). В этой связи определенную роль играет и материал, из которого сделан электрод. Наконец, в естественных условиях зачастую трудно расчленить электротропизм и геотропизм: и гравитационные, и электромагнитные поля действуют вдоль осевых органов растений, «диктуя» тем самым их полярность.

Но, оказывается, есть надежный способ расчленить действие этих двух биогенных сил. Его обнаружили, когда начали исследования по космическому растениеводству с использованием клиноставов, имитирующих невесомость. Медленный горизонтальный клиностав представляет собой сосуды с растениями, вращающиеся вокруг горизонтальной оси, со скоростью ~ 2 об/мин, что избавляет растения от воздействия земного тяготения и создает идеальные условия для наблюдения электротропизма. Стоило ученым Смоленского сельскохозяйственного института поместить на дне вращающегося в клиноставе сосуда отрицательный электрод, а на поверхность субстрата — положительный, как все корешки потянулись вглубь, ко дну сосуда. Когда же электроды поменяли местами, корни вышли на поверхность и даже в воздух, хотя здесь их ждала гибель. Такова для корневой системы растений притягательная сила отрицательных зарядов! Так еще раз был подтвержден электротропизм, как одно из важных свойств корня.

Это явление затем было использовано для создания лучших условий выращивания растений на орбитальных станциях. Но об этом позже. А сейчас еще об одной весьма интересной «профессии» электрических зарядов в живом растении.

Зачем пчеле заряд?

Не так давно в Центральной генетической лаборатории им. И. В. Мичурина изучали содержание свободных аминокислот в электрически разноименно заряженных фракциях

пыльцы черной смородины. Проведение таких исследований связано с тем, что мужские генеративные органы высших растений обладают различной оплодотворяющей способностью и зачастую бывают стерильными. Ранее было выявлено, что это обуславливается наличием избыточного содержания некоторых аминокислот. Было решено исследовать взаимосвязь этого фактора с другим — разным зарядом пыльцы.

Когда провели все анализы и наблюдения в эксперименте, то выяснили, что положительно заряженные пыльцевые зерна имеют большую (в 2—3 раза) жизнеспособность, чем отрицательные. Оказалось все дело в том, что в последних в большем количестве содержатся аминокислоты, структурно более простые, алифатические. В положительно заряженных пыльцевых зернах аминокислот меньше, но все они сложные, потому и жизнеспособность их гораздо выше.

Ряд уникальных работ по электрофизиологии полового размножения высших растений поставили в лаборатории биофизики Отдела генетики растений АН Молдавской ССР и в Отделе биофизики Кишиневского сельскохозяйственного института им. М. В. Фрунзе. Здесь, в частности, впервые было обнаружено явление генерации и распространения потенциалов действия в пестиках кукурузы после нанесения пыльцы на рыльца. Наблюдались они и при последующем ее прорастании. Эта форма электрического ответа, по-видимому, является первым звеном в цепи реакций, осуществляющих подготовку растения к переходу в новое качественное состояние. Затем идет распространение волны электровозбуждения за пределы генеративной сферы: к стеблю, корню и т. д.

Таким образом, цепь электрофизиологических реакций в процессе оплодотворения охватывает все растение. В свете этих явлений по-новому представляется роль и значимость электрического заряда пыльцы. Он, оказывается, влияет на конечный результат полового процесса, на передачу наследственной информации новому организму, а следовательно, и на качество потомства. Вот что «стоит» маленький заряд микроскопического пыльцевого зернышка! Определена и величина этого заряда. Она равна всего-навсего 10^{-16} — 10^{-17} Кл, а заряд семязпочки (женский орган) уже больше — 10^{-13} — 10^{-14} Кл. Интересно, что сопоставление экспериментальных данных по заряду пыльцы растений и спермиев животных позволя-

ет отождествлять появление этих признаков в живой природе.

Установив электрофизиологическую разнокачественность пыльцы, ученые сразу стали искать пути практического использования своего открытия. Для начала нужно было разделить пыльцу на положительную и отрицательную. Оказалось, это дело несложное и хорошо получается при использовании электростатического поля высокой напряженности, величиной примерно $2 \cdot 10^5$ В/м. И тут выяснилось, что поле и само по себе оказывает положительное влияние на оплодотворяющую способность пыльцы. Когда семена кукурузы, полученные при опылении положительно заряженной пыльцой, высеяли и вырастили из них растения, обнаружили, что такой прием способствует повышению продуктивности растений.

Если людьми это установлено недавно, то природа испокон веков производит отбор нужной пыльцы с помощью электричества. И делают это насекомые. Поистине поразительна изобретательность природы!

Известно, что летающие насекомые (мухи, шмели, пчелы и др.) покрыты хитиновой оболочкой. Материал, ее складывающий, — диэлектрик. Очевидно, при взмахе крыла насекомое вырабатывает электричество, в результате чего отдельные части его тела получают заряд. Установлено, что пчела, покидая улей рано утром, несет слабый отрицательный заряд. Но вскоре — в ходе полета — он меняется у нее на положительный. Причем его величина к полудню постепенно нарастает, в хороший солнечный день достигая 1,5—1,8 В.

Электрический заряд приносит пчеле немалые выгоды: при подлете ее к цветку пыльца не разлетается, а прочно притягивается и хорошо удерживается на ее мохнатом тельце. В итоге она больше запасает корма и одновременно лучше опыляет растения. Более того, изменяя заряд оставшейся пыльцы, пчела как бы предупреждает своих подруг о взятии с этого цветка нектара и пыльцы. Вполне возможно, считает академик ВАСХНИЛ Л. Г. Прищеп, что пчелы-разведчицы информацию о месте расположения цветка в процессе своего «танца» не в последнюю очередь передают с помощью перезаписи информации о полете на электрическую систему других пчел. Вот мы и ответили на вопрос, стоящий в заголовке этого раздела: «Зачем пчеле заряд?».

Внимательный читатель в рассказе о пчелах наверняка усмотрел явное несоответствие электрических зарядов: у

растений лучшей оказывается положительно заряженная пыльца, а пчелы, тоже имея «плюс» на своем «борту», могут, конечно, забирать и передавать другим цветкам отрицательно заряженную пыльцу. Имеющиеся в нашем распоряжении данные пока именно таковы. Но есть и другие сведения: заряд Земли в течение суток может изменяться; очевидно, не обязательно быть постоянному заряду и у пчелы. Возможно и другое объяснение. Поскольку хитин — диэлектрик и его основное физическое свойство — поляризация, то он представляет собой совокупность диполей. А электрический диполь — это два полюса, противоположные по знаку, но равные по величине заряда. Следовательно, пчела, имея два различных заряда, может сепарировать прилипшую к тельцу пыльцу: положительно заряженную отдать соседнему цветку, а отрицательно заряженную отнести в улей. Очевидно, ей так выгоднее.

Электрообработка семян

Наиболее изученным направлением в электрокультуре является применение электромагнитных полей для предпосевной обработки семян. Многочисленные приемы и способы этого дела, устройства для его осуществления уже находят широкое применение в практике. Большая заслуга в этом принадлежит коллективам проблемной лаборатории электронно-ионной технологии Челябинского института механизации и электрификации сельского хозяйства (ЧИ-МЭСХ), Московского института инженеров сельскохозяйственного производства, других организаций.

Разрабатывая методы электростимуляции семян и не имея на этот счет хороших теоретических предпосылок (их пока нет), экспериментатор, как правило, обращается к наблюдаемым природным явлениям. Рассуждения ведут примерно следующим образом. В естественных условиях семена формируются летом, когда в воздухе больше всего положительных аэроионов. Приближается осень, постепенно уменьшается и их количество. Затихает обмен веществ в клетках растений. Но вот заканчивается долгая зима, с каждым днем становится теплее, светлее, изменяется и напряженность электрического поля Земли. И тогда-то семена ненадолго вносят в искусственное электрическое поле, словно наполняя их энергией, подгоняя биопотенциал. Теперь «подзаряженные» семена быстрее приспособляются к естественному электрическому полю и прорасти станут активнее.

Напряженность естественного поля зависит от состояния солнечной активности. Значит, и обработку семян нужно проводить дифференцированно, строго учитывая деятельность нашего светила. Больше того, при сеансах электрооблучения немалое значение имеет даже время суток. Секрет прост: на постоянный режим облучения накладывается естественный — от утра к ночи — режим изменения напряженности поля планеты. Есть мнение, что электрические заряды, которые семена получают в поле, затем покидают их вместе с испаряющейся влагой. Так что и эту потерю надо как-то компенсировать.

Некоторые ученые интерпретируют роль природных условий несколько иначе. Они считают, что семена, осыпаясь после созревания на землю, не подвергаются тем градиентам атмосферного электрического поля, которым могли бы быть подвержены, если бы находились на растении (чем выше оно подняло свой стебель или ствол, тем в более сильном поле формируются семена). Значит, преждевременно осыпавшиеся, как и убранные с поля, семена недополучают должный заряд. Выходит, посевной материал необходимо «подзарядить».

Действительно, многочисленные эксперименты свидетельствуют, что пребывание семян в искусственном электромагнитном поле, по параметрам близкому к естественному, дает существенный эффект. Так, в одном из опытов набухающие семена салата поместили в электрическом поле напряженностью 180 В/м. И развитие растений ускорилось, но только при нахождении в зоне отрицательных зарядов. На результативности электровоздействия сказывался и свет: обработка семян при чередовании света и темноты (день — ночь), значительно ослабляла влияние электромагнитной обработки.

Впрочем, эффект наблюдается и при обработке семенного материала полем высокого напряжения, но при малом времени воздействия. С целью биостимуляции семян различных сельскохозяйственных культур в последнее время применяют поля коронного разряда с напряженностью от $2 \cdot 10^5$ до $6,5 \cdot 10^5$ В/м при времени обработки от 2 до 90 с в зависимости от видовой принадлежности растения. Эффективны и другие параметры электрического поля, но каждый при определенной продолжительности воздействия.

Но теперь иные, чем в пору предыдущего взлета электрокультуры, времена, всякий эксперимент — это глубокий поиск, а не только измерение урожая. Так, в ЧИМЭСХе установлено, что при обработке семян постоянным элект-

рическим полем возрастает интенсивность поглощения ими воды, на 30—200 % усиливается дыхание, повышается активность фермента каталазы в проростках. Лучшие результаты получаются при обработке семян в короне отрицательного поля и последующей их отлежке до посева в течение 12 дней. Если же обработка ведется в положительной короне, то тогда отлежка должна длиться 18 дней. В любом случае урожай яровой пшеницы возрастал на 5—15 %. Это происходило в основном за счет увеличения числа зерен в колосе (на 6—29 %) и выполненности зерна (на 2—6,5 %), а также большего числа растений, сохранившихся к уборке урожая. Обработка семян лука, моркови, ячменя и ржи электрическими полями стимулирует энергию прорастания на 10 %, увеличивает урожайность в среднем на 14 %. При обработке в поле коронного заряда семян сахарной свеклы при определенном росте урожайности повышалась сахаристость корней на 0,56—0,86 %. При этом установлено, что эффект электростимуляции существенно изменяется в зависимости от часа суток обработки семян и тем сильнее, чем ниже качество посевного материала.

В Кубанском сельскохозяйственном институте определяли оптимальные режимы электрообработки семян гороха. При напряженности поля $1,5 \cdot 10^5$ В/м и экспозиции 10—30 мин всхожесть семян в последующем была максимальная — 98,5 %, а при напряженности $2,5 \cdot 10^5$ В/м такая же всхожесть достигается после одноминутной обработки. Дальнейшее увеличение напряженности (до $3,5 \cdot 10^5$ В/м) и продолжительности воздействия (до 1,5 мин) угнетало семена, их всхожесть падала. Аналогичное влияние электростимуляция оказывала на семена риса.

Не менее интересные факты сообщили сотрудники Ленинградского сельскохозяйственного института. Здесь в электрическое поле переменного тока напряженностью $4 \cdot 10^5$ В/м на 3 мин помещали семена ряда силосных культур. В результате всхожесть семян канареечника тростникового повысилась на 20 %, маральего корня — на 10, вайды красильной — на 5, а горца Вейриха — на 50 %.

Полученные во многих институтах положительные результаты электрообработки семян различных сельскохозяйственных культур позволили начать широкое внедрение этого способа биологической стимуляции в производство. В ЧИМЭСХе разработана серия электрообрабатывающих машин, включающая транспортерные, барабанные и камер-

ные. Наибольшее распространение из них получила машина марки ЭОМ-Т производительностью около 3 т/ч. Работает она следующим образом: зерно из бункера поступает на транспортерную ленту, являющуюся некоронирующим электродом. Семена, двигаясь по ленте, проходят под электродом, на который подается высокое напряжение, и затем поступают в выгрузное устройство. Напряженность поля от $4 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^5$ В/м, время обработки 2—3 с.

Разработаны и нашли практическое применение и различные варианты электростатических сепараторов семян. Сама по себе эта операция весьма трудоемка, состоит из многократного просеивания материала через сита с отверстиями разного диаметра, других операций. Электрополе упрощает этот процесс и одновременно за счет биологической стимуляции повышает качество семенного материала. Например, в Грузии три года подряд проводили электросепарацию семян лука и моркови. И средняя урожайность поднялась у первой культуры на 10, у второй — на 10,7 %. Доход от урожая лука в расчете на гектар по сравнению с контрольным увеличился на 364 руб., или на 18 %, а моркови — на 180,5 руб., или на 13 %.

Созданные для электросепарации машины менее энергоемки в сравнении с традиционными механическими, более экономичные, менее материалоемкие. Годовой экономический эффект от их применения, например, при сепарации селекционных семян трав составляет 200—500, при подготовке семян сахарной свеклы — 100 руб.

Во многих зонах страны эффективно используется предпосевная электрообработка клубней картофеля. К сортировальному пункту делается несложная приставка, создающая переменное электрическое поле напряженностью 1,0—2,5 кВ/см. Клубни находятся в таком поле 5—7 с. После чего в них увеличивается количество проросших глазков и ростков, повышается интенсивность роста побегов и корневой системы, стебли имеют большую облиственность. Выход семян увеличивается при этом на 21 %, крахмальность — на 0,8—2,8 %, общий урожай — на 26—45 ц/га при урожае на контроле 222—234 ц/га.

Для быстреего включения электростимуляции посевного материала в существующую технологию возделывания сельскохозяйственных культур разработаны методы обработки семян током с промышленной частотой 50 Гц. При разных режимах такой обработки в проростках культуры и пшеницы значительно возрастает содержание нуклеиновых кислот, аминокислот и сахаров, интенсивность фотосинтеза

повышается на 11—37 %. Причем при увеличении срока отлежки семян после обработки до 17 дней эффект возрастает. В совхозе «Пятигорский» Ставропольского края, где 5 лет вели производственную проверку этого метода, стабильная прибавка урожая зерна и зеленой массы кукурузы поднималась до 15 %.

Для стимуляции семян все шире используют обработку их электромагнитным полем высокой частоты. Установлены оптимальные режимы. Лучшими оказались частота 40,68 МГц при напряженности поля 25—40 кВ/м и времени воздействия 30—40 с. Разработаны номограммы, пользуясь которыми можно регулировать режим электрообработки в зависимости от влажности и температуры семян. В целом этот прием повышает энергию прорастания семян на 5—12 %, всхожесть — на 5—25, урожай — на 12—25 %. Эффект затухает при напряженности поля свыше 40 кВ/м и если обработанные семена не высеваются через 2—4 суток после облучения. По данным Красноярского сельскохозяйственного института, годовой экономический эффект от использования данного способа при обработке семян редиса составляет 205, капусты — 720 руб./га.

В Челябинской области уже несколько лет действуют поточные линии предпосевной подготовки лука-севка, семян люцерны, донника, овсяницы и других мелкосемянных культур с помощью высокочастотного электромагнитного поля. При обработке лука-севка наблюдается стабильное повышение урожая на 25—30 %. Годовой экономический эффект от применяемой установки производительностью 1 т/ч составляет 60 тыс. руб.

Положительно влияет электрическое поле на качественное состояние древесной пыльцы. Так, при непрерывном действии в течение трех лет электростатического поля в 200 и в 2000 В/м семена сосны, лиственницы и пихты имели всхожесть на 6—10 % выше контрольных. Если же поле было очень сильным ($2 \cdot 10^5$ В/м), всхожесть семян резко ухудшалась.

Ну, а теоретическое обоснование эффективности предпосевной обработки семян электромагнитным полем? В наши дни ученые считают, что оно, как и световые импульсы, способно вызывать первичную биофизическую энергизацию клетки. Это подтверждается и экспериментально. Так, в клетке, энергизованной и поддерживаемой в активном состоянии электрическими импульсами, фотосинтез может протекать достаточно эффективно при относительно

низкой световой облученности, т. е. недостаток света компенсируется электрической энергизацией фотосистемы клетки.

Такое предположение высказал Б. Н. Китлаев. «С этими утверждениями, — пишет он, — согласуется обнаруженный нами ранее любопытный факт, который заключается в том, что при некоторых стимулирующих режимах воздействия на растения электрических импульсов в промежутках между ними можно зарегистрировать ответные импульсы от растений, превосходящие по амплитуде действующие и имеющие кинетику, сходную с кинетикой долгоживущих компонентов ДСП (длительного послесвечения). Подобно тому как действие импульсов ФАР (фотосинтетически активная радиация Солнца. — А. Г., В. Ш.) вызывает фотофосфорилирование, фотосинтез, по-видимому, можно предположить, что при действии электрических импульсов могут возникать процессы “электрофосфорилирования”, “электросинтеза”, которые обеспечивают усиление ответного импульса» [Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1982. № 4. С. 21—26].

Практическая проверка этих положений при импульсном лазерном облучении растений дала обнадеживающие результаты. Опыт был таков: рассаду огурцов сорта ТСХА-211 обрабатывали импульсами гелий-неонового лазера с длиной волны 630 нм методом сканирования несфокусированного луча. Растения облучали в течение светового дня на протяжении всего периода роста рассады. В этом случае, как оказалось, расход энергии в зимних теплицах на досвечивание огурцов можно снизить вдвое и использовать для этого импульсное лазерное облучение из расчета в среднем $0,003 \text{ Вт/м}^2$.

Таков ли механизм воздействия электромагнитных волн на растения или он иной, покажут будущие исследования. Но пока с большой точностью установлено и не в единичных экспериментах, что в обработанных электричеством семенах активизируется ферментативная деятельность, улучшается проницаемость мембран, быстрее идет распад запасенных энергетических материалов. Следовательно, электромагнитное поле досрочно запускает механизм прорастания семян и, возможно, в какой-то мере подкрепляет их энергетические ресурсы. Однако так происходит не всегда. В ходе экспериментов почти у всех занимающихся этими вопросами исследователей сложилось убеждение, что на полноценных семенах положительное действие электрообработки не проявляется.

Электрокультура растений

Высаженное в почву семя дало росток. Затем день за днем растение вытягивает стебель вверх, к Солнцу и к положительно заряженной ионосфере, а корни зарывает глубже в почву, к воде, пище и к отрицательным зарядам. К лету стебельки начинают расти еще интенсивнее. Ведь тогда наряду с увеличением температуры окружающей среды и улучшением освещенности в воздухе становится все больше положительных аэроионов, которые буквально дождем сыплются на листья. Поэтому наземную часть травы, кустарников и деревьев можно смело считать потребителями атмосферных зарядов.

Что же касается другого полюса растений — его корневой системы, то на нее благотворно влияют отрицательные аэроионы. Для доказательства исследователи между корнями томата проложили положительно заряженный стержень — электрод, «вытягивающий» отрицательные аэроионы из почвы. Урожай томатов увеличился сразу в 1,5 раза. Кроме того, оказалось, что в почве с высоким содержанием органических веществ больше накапливается отрицательных зарядов. В этом также видят одну из причин роста урожаев.

Существенным стимулирующим действием обладают и слабые постоянные токи, когда их пропускают непосредственно через растения, в зону корней которых помещен отрицательный электрод. Линейный рост стеблей при этом увеличивается на 5—30%. Такой способ очень эффективен с точки зрения энергозатрат, безопасности и экологии. Ведь мощные поля могут отрицательно влиять на микрофлору почвы. К сожалению, эффективность слабых полей исследована совершенно недостаточно.

Определенный интерес для понимания общих тенденций электрокультуры представляют работы с древесными растениями в молодом возрасте. Когда их экранировали от естественного электрического поля, у сосны, например, наблюдалось снижение интенсивности транспирации вследствие нарушения анатомического строения устьичного аппарата. В итоге втрое уменьшался фотосинтез, а масса хвои в среднем за четыре года сократилась в 5 раз, стволов с ветками — в 3, корневой системы — в 2,4 раза.

Отсюда следует практический вывод: в лесу естественным экраном являются высокие растения, которые снижают напряженность атмосферного электрического поля на 25—30% и тем значительно угнетают подрост. При воздействии на угнетенный подрост сосны под пологом леса

искусственным электрическим полем, близким по параметрам к естественному, развитие его значительно улучшается. Прирост молодых деревьев в высоту увеличивается на 22—40, масса хвои — на 33 %. Если на саженцы сосны по 20 мин в сутки воздействовать полем величиной $2 \cdot 10^4$ В/м (близко к значению грозового поля), то прирост их возрастает на 35—37 %. Когда же такое поле действует непрерывно, прирост снижается на 48—60 %.

Известно, какие сложности приходится преодолевать, чтобы в искусственных условиях вырастить женьшень, который и в тайге развивается крайне медленно, часто погибает. Однако ученым Винницкого ботанического сада удалось для «корня жизни» создать условия, в которых он чувствует себя лучше, чем даже в природе. Среди других мер весьма благотворной оказалась обработка семян и молодых побегов женьшеня магнитным полем.

В число перспективных направлений электрокультуры на данном этапе включена подача определенных зарядов к растениям путем электризации капель воды, используемой для полива, или растворов ядохимикатов, защищающих их от болезней и вредителей. Это сулит заметное повышение продуктивности полей. Для электрообработки воды обычно на наконечник и к подводящему трубопроводу оросительной системы подают высокое напряжение. При этом замечено, что для получения дополнительного стимулирующего эффекта поливную воду перед обработкой электрическим полем необходимо насыщать одним или несколькими газами и микроэлементами. Зачем? При подаче высокого напряжения на поливную воду, насыщенную углекислым газом, пузырьки газа, вырываясь из воды, уносят с собой к растению электрический заряд заданного знака, благодаря чему улучшается фотосинтез, а вода становится более доступной для возделываемой культуры.

Недавно предложен еще более совершенный способ электрообработки воды, используемой для дождевания. Суть его сводится к тому, что падающим на надземную часть растений каплям воды сообщают положительный заряд, а влаге, поступающей к корням, — отрицательный. При таком двойном воздействии общая эффективность электричества резко вырастает.

В ряде институтов, в частности в Украинской сельскохозяйственной академии, воду пропускали через поле коронного разряда. При этом была выявлена интересная закономерность: эффективность обработки зависела от исходного значения концентрации ионов водорода. Минималь-

ной она была при рН 7, т. е. при нейтральной реакции среды. Обработка воды коронным разрядом приводит к снижению ее кислотности (уменьшалась концентрация ионов водорода) и увеличению насыщения жидкости ионами атмосферного азота.

Электризацию воды применяют и при обработке посевного материала. Для этой цели разработан специальный электрический аппарат. На его медные пластины подают постоянный ток от 0,1 до 8 А, и между ними пропускают воду (0,02—0,1 л/с). Интересно обнаруженное при этом явление: когда полили такой водой семена пшеницы, то всхожесть их повысилась на 4—19 %, а урожайность культуры — на 13—41 %. Кроме того, электризованная вода испарялась быстрее на 6—27 %, причем эти изменения сохранялись в течение 7 ч после обработки.

Широко используют электризацию растворов химических средств защиты растений. Для этих целей в Англии, Австралии, СССР, ряде других стран разработаны специальные электростатические опрыскиватели. Приобретая заряд, частицы раствора лучше притягиваются и прочно удерживаются листьями, стеблями растений. В модели опрыскивателя, разработанной на Ротамстедской опытной станции, электростатический заряд раствору сообщается от вращающегося диска. Этот опрыскиватель, работающий как с масляными, так и с водными растворами химикатов, устанавливается на тракторе, который является источником энергии.

Перспективный электростатический опрыскиватель для обработки плантаций хлопчатника инсектицидами и дефолиантами недавно выпущен в США. За 10 ч им можно обработать свыше 60 га посевов. Электрозарядку частиц препарата обеспечивает стандартная 12-вольтная батарея. Новый опрыскиватель дороже обычных таких машин, но благодаря снижению расхода ядохимиката в 2 раза и повышению его эффективности, аппарат окупает себя за 2—3 года.

Метод электроаэрозолей получает все более широкое распространение и в нашей стране. Во Львове налажено серийное производство опрыскивателей с электростатическим зарядом капель рабочей жидкости. Отметим, что электрозарядные устройства, основанные на индукционном, коронном и контактном методах электризации, являются одновременно рабочим органом машин для создания аэрозолей. Испытываемые образцы устройств для зарядки аэрозолей дают хорошие результаты в производственных условиях.

Немало и других устройств, но описывать их не станем, не это наша главная цель. Как показали исследования и практическое применение, это очень выгодное дело. На растениях осаждается в 2 раза и более больше препарата, чем при обработке посевов с помощью обычных опрыскивателей. Значительно снижается и крайне нежелательный снос ядохимикатов, загрязнение воздуха и почвы. Есть и другие плюсы. Проверка экспериментальных образцов электроопрыскивателей показала, что в этом случае без потери результативности действия препаратов их доза может быть снижена наполовину, а иногда и больше, без ущерба для урожая. Значительно уменьшаются также затраты на горючее. Электрорядка капель регулирует и их размер. Кроме того, одинаково заряженные частицы отталкиваются друг от друга, сохраняют между собой определенные расстояния. Это очень важно, поскольку решается сложнейшая проблема обеспечения равномерности покрытия каплями растений.

Электризация почвы

Как бы не был велик соблазн для ученых, специалистов с помощью электростимуляции семян и растений резко и стабильно повышать продуктивность сельскохозяйственных культур, пока это не удастся. И потому все чаще и чаще взоры свои они обращают к почве — основной среде обитания зеленых друзей наших.

То, что электричество может повысить плодородие верхнего слоя земли, т. е. приумножить его способность формировать урожай, доказано давно. Но как это сделать лучше, как увязать электризацию почвы с земледельческой технологией? Вот те проблемы, которые нужно решить сейчас, не откладывая на завтра. Причем нельзя забывать, что почва — объект биологический. И при неумелом вмешательстве в этот за миллионы лет сложившийся организм, особенно столь мощным средством, каким является электричество, можно нанести ему непоправимый ущерб. Кстати, в практике человечества такое случалось не единожды. Антропогенная эрозия, непредвиденные последствия крупномасштабной мелиорации, загрязнение почвы химикатами — вот далеко не полный перечень недалековидных шагов земледельца.

Конечно, те, кто занимается электровоздействием на почву, в данном приеме видят прежде всего способ влияния на корневую систему растений. Действительно, к на-

стоящему времени накоплено немало данных, показывающих, что слабый электрический ток, пропущенный через почву, стимулирует в растениях ростовые процессы. Но результат ли это прямого действия электричества на корневую систему, а через нее и на все растение или итог физико-химических изменений в почве? Определенный шаг к пониманию проблемы сделали ленинградские ученые.

Поставленные ими опыты были весьма изощренными, ведь предстояло выявить глубоко спрятанную истину. Брали небольшие полиэтиленовые трубки-камеры с отверстиями, в которые высаживали проростки кукурузы. Трубки заполняли питательным раствором с полным набором необходимых проросткам химических элементов. И через него с помощью инертных в химическом отношении платиновых электродов пропускали постоянный электрический ток величиной 5—7 мкА/см². Объем раствора в камерах постоянно поддерживали на одном уровне, добавляя дистиллированную воду. Воздух, а он тоже крайне нужен корням, систематически подавали (в виде пузырьков) из специальной газокамеры. За составом питательного раствора непрерывно следили датчики того или иного элемента — ионселективные электроды. И по зарегистрированным изменениям делали вывод, что и в каком количестве поглощено корнями. Все другие каналы утечки химических элементов были перекрыты. Параллельно работал контрольный вариант, в котором все было абсолютно таким же, за исключением одного — через раствор электрический ток не пропускали. И что же?

Не прошло и 3 ч с начала эксперимента, а разница между контрольным и электрическим вариантами уже выявилась. В последнем элементы питания поглощались корнями активнее. Но, возможно, дело не в корнях, а в ионах, которые под действием внешнего тока стали быстрее передвигаться в растворе? Для ответа на этот вопрос в одном из опытов предусмотрели измерение биопотенциалов проростков и в определенное время включали в «работу» гормоны роста. Почему? Да потому, что они без всякой дополнительной электростимуляции изменяют активность поглощения корнями ионов и биоэлектрическую характеристику растений.

Не станем описывать весь ход эксперимента. Приведем лишь выводы, сделанные его авторами: «Пропускание слабого электрического тока через питательный раствор, в который погружена корневая система проростков кукурузы, оказывает стимулирующее действие на поглощение расте-

ниями ионов калия и нитратного азота из питательного раствора». Значит, все-таки электричество стимулирует деятельность корневой системы? Но как, через какие механизмы?

Для полной убедительности в корневом эффекте электричества поставили еще один опыт, в котором также был питательный раствор, были корни, теперь уже огурцов, измеряли также биопотенциалы. И в этом эксперименте работа корневой системы при электростимуляции улучшалась. Однако до разгадки путей ее действия снова далеко, хотя уже познано: электрический ток оказывает на растения как прямое, так и косвенное воздействие, степень влияния которых определяется целым рядом факторов!

Следовательно, до полной ясности еще далеко. И сколько еще надо поработать, чтобы выявить и математически доказать роль каждого фактора, установить степень их участия в общем эффекте! Только тогда можно будет вести речь о подборе таких режимов электризации почвы, которые бы в первую очередь стимулировали само растение, а затем уже помогали ему добывать пищу в таком сложнейшем и далеко еще не познанном субстрате, как почва.

Тем временем исследования эффективности электризации почвы расширяются и углубляются. Сегодня их, как правило, проводят в теплицах или в условиях вегетационных опытов. Это и понятно: только так можно уйти от ошибок, которые невольно допускали тогда, когда пытались эксперименты сразу организовать в полевых условиях, в которых невозможно наладить контроль за каждым отдельным фактором.

Весьма обстоятельные опыты с электризацией почвы в Ленинграде провел В. А. Шустов. В слабо подзолистую суглинистую почву он добавил 30 % перегноя и 10 % песка и через эту массу перпендикулярно корневой системе между двумя стальными или угольными электродами (лучше показали себя последние) пропустил ток промышленной частоты плотностью $0,5 \text{ мА/см}^2$. Урожай редиса вырос на 40—50 %. А вот постоянный ток такой же плотности снизил сбор этих корнеплодов по сравнению с контролем. И лишь понижение его плотности до $0,01—0,13 \text{ мА/см}^2$ вызвало повышение урожая до уровня, полученного при использовании переменного тока. В чем тут причина?

Используя меченый фосфор, установили, что переменный ток выше указанных параметров благотворно влияет на усиление поглощения растениями этого важного энерге-

тического элемента. Проявилось так же и положительное действие постоянного тока. При его плотности $0,01 \text{ мА/см}^2$ получен урожай, примерно равный тому, что был получен при применении переменного тока плотностью $0,5 \text{ мА/см}^2$. Кстати, из четырех испытываемых частот переменного тока (25, 50, 100 и 200 Гц) лучшей оказалась частота в 50 Гц. Если же растения прикрывали заземленными экранирующими сетками, то урожай овощных культур значительно снижался.

В Армянском НИИ механизации и электрификации сельского хозяйства применяли электричество для стимуляции растений табака. Изучали широкий спектр плотностей тока, пропускаемого в поперечном сечении корнеобитаемого слоя. У переменного тока он был 0,1; 0,5; 1,0; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2 и $4,0 \text{ А/м}^2$, у постоянного — 0,005; 0,01; 0,03; 0,05; 0,075; 0,1; 0,125 и $0,15 \text{ А/м}^2$. В качестве питательного субстрата использовали смесь, состоящую на 50 % из чернозема, на 25 % из перегноя и на 25 % из песка. Наиболее оптимальными оказались плотности тока $2,5 \text{ А/м}^2$ для переменного и $0,1 \text{ А/м}^2$ для постоянного при непрерывной подаче электричества в течение полутора месяцев. При этом выход сухой массы табака в первом случае превышал контроль на 20, а во втором — на 36 %.

Или вот томаты. Экспериментаторы создавали в их корнеобитаемой зоне постоянное электрическое поле. Растения развивались намного быстрее контрольных, особенно в фазу бутонизации. У них была больше площадь листовой поверхности, повышена активность фермента пероксидазы, усиливалось дыхание. В результате, прибавка урожая составила 52 %, и произошло это в основном за счет увеличения размеров плодов и их количества на одном растении.

Постоянный ток, пропускаемый через почву, благотворно влияет и на плодовые деревья, что подметил еще И. В. Мичурин. В этом случае они быстрее проходят «детский» (ученые говорят «ювенильный») этап развития, повышается их холодостойкость и устойчивость к другим неблагоприятным факторам среды, в итоге увеличивается урожайность. Чтобы не быть голословными, приведем конкретный пример. Когда через почву, на которой росли молодые хвойные и лиственные деревца, непрерывно в течение светлого периода суток пропускали постоянный ток, в их жизни происходил целый ряд примечательных явлений. В июне—июле опытные деревья отличались более интенсивным фотосинтезом, что явилось результатом стимули-

рования электричеством роста биологической активности почвы, повышения скорости движения почвенных ионов, лучшего поглощения их корневыми системами растений. Более того, ток, протекающий в почве создавал большую разность потенциалов между растениями и атмосферой. А это, как уже говорилось, фактор сам по себе благоприятный для деревьев, особенно молодых.

В соответствующем опыте, проведенном под пленочным укрытием, при непрерывном пропускании постоянного тока фитомасса однолетних сеянцев сосны и лиственницы увеличилась на 40—42 %. Если бы такой темп прироста сохранить в течение нескольких лет, то нетрудно представить, какой огромной выгодой обернулось бы это для лесозаготовителей.

Нужно отметить, что опытов по электризации почвы проведено очень много как в нашей стране, так и за рубежом. Установлено, что это воздействие изменяет передвижение различных видов почвенной влаги, способствует разложению ряда трудноусвояемых для растений веществ, провоцирует самые разнообразные химические реакции, в свою очередь, изменяющие реакцию почвенного раствора. При электровоздействии на почву слабыми токами в ней лучше развиваются микроорганизмы. Определены и параметры электрического тока, оптимальные для разнообразных почв: от 0,02 до 0,6 мА/см² для постоянного тока и от 0,25 до 0,5 мА/см² для переменного.

Однако на практике ток указанных параметров даже на аналогичных почвах может и не дать прибавки урожая. Это объясняется тем многообразием факторов, которые возникают при взаимодействии электричества с почвой и возделываемыми на ней растениями. В почве, принадлежащей к одной и той же классификационной «ячейке», в каждом конкретном случае могут быть совершенно различные концентрации водорода, кальция, калия, фосфора, других элементов, могут быть несхожие условия аэрации, а следовательно, и прохождения собственных окислительно-восстановительных процессов и т. д. Наконец, нельзя забывать о постоянно изменяющихся параметрах атмосферного электричества и земного магнетизма. Многие также зависят от применяемых электродов и способов электровоздействия (постоянное, кратковременное и т. д.).

Вследствие этих и ряда других причин электризация почвы, хотя и способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур, и иногда довольно значитель-

ному, широкого практического применения не находит. Понимая это, ученые ищут новые подходы к проблеме. Так, предложена обработка почвы электрическим разрядом для фиксации в ней азота — одного из самых главных «блюд» для растений. Для этого в почве и атмосфере создают высоковольтный маломощный непрерывный дуговой разряд переменного тока. И там, где он «работает», часть атмосферного азота переходит в нитратные формы, усвояемые растениями. Однако происходит это, конечно, на небольшом участке поля.

Более эффективен другой способ увеличения количества усвояемых форм азота в почве. Он заключается в применении кистевого электрического разряда, создаваемого непосредственно в пахотном слое. Кистевой разряд — это одна из форм газового разряда, возникающая при атмосферном давлении на металлическом острие, к которому подан высокий потенциал. Величина потенциала зависит от положения второго электрода и от радиуса кривизны острия, но в любом случае он должен измеряться десятком киловольт. Тогда на кончике острия возникает кистеобразный пучок перемежающихся и быстро смешивающихся электрических искр. Такой разряд вызывает образование в почве большого числа каналов, в которые проходит значительное количество энергии и, как показали лабораторные и трехгодичные полевые эксперименты, способствует увеличению в почве усвояемых растениями форм азота и, как следствие, повышению урожая. Именно это происходило на опытных делянках размером 5×30 м, когда на помещенные там электроды подавали напряжение 15 кВ (энергия единицы импульса при этом составляла 2,5 Дж и ее плотность — 8,5 Дж/кг почвы). Проведенные кистевые обработки поля с высеянным ячменем повысили сбор зерна (по сравнению с контролем) почти на треть. Выгода оказалась в том, что против обычного удалось значительно сократить дозы вносимых азотных удобрений.

Весьма любопытен другой способ электризации почвы — без внешнего источника тока, который является современной модификацией способа, предложенного Е. Пилсудским. В наши дни данное направление развивает Кировоградский исследователь И. П. Иванько. Он рассматривает почвенную влагу как своеобразный электролит, находящийся под воздействием электромагнитного поля Земли. На границе раздела металл—электролит, в данном случае металлопочвенный раствор, возникает гальванозлектриче-

ский эффект. В частности, при нахождении в почве стального провода на его поверхности в результате окислительно-восстановительных реакций образуются катодные и анодные зоны, происходит постепенное растворение металла. В итоге на межфазных границах возникает разность потенциалов, достигающая 40—50 мВ. Образуется она и между двумя проводами, уложенными в почве. Если провода находятся, например, на расстоянии 4 м, то разность потенциалов составляет 20—40 мВ, но сильно варьирует в зависимости от влажности и температуры почвы, ее механического состава, количества удобрений и других факторов.

Электродвижущую силу между двумя проводами в почве автор назвал «агро-ЭДС», ему удалось не только ее измерить, но и объяснить общие закономерности, по которым она образуется.

Характерно, что в определенные периоды, как правило, при смене фаз Луны и изменениях погоды, стрелка гальванометра, при помощи которого замеряют возникающий между стержнями ток, резко изменяет положение — сказываются сопровождающие подобные явления перемены в состоянии электромагнитного поля Земли, передающиеся почвенному «электролиту».

Исходя из этих представлений, автор предложил создавать электролизуемые агрономические поля. Для чего специальный тракторный агрегат щелевателем-проводоукладчиком распределяет сматываемый с барабана стальной провод диаметром 2,5 мм по дну щели на глубине 37 см. Пройдя гон, тракторист включает гидросистему на подъем, рабочий орган выглубляется из почвы, а провод обрубается на высоте 25 см от поверхности земли. Через 12 м по ширине поля операция повторяется. Заметим, что размещенная таким образом проволока не мешает проведению обычных агротехнических работ. Ну, а если потребуется, то стальные проводники легко удалить из почвы при помощи узла размотки и намотки мерной проволоки (им оснащались кукурузные сеялки).

Экспериментами установлено, что при таком способе на электродах наводится агро-ЭДС величиной 23—35 мВ. Поскольку электроды имеют разную полярность, между ними через влажную почву возникает замкнутая электрическая цепь, по которой течет постоянный ток плотностью от 4 до 6 мкА/см² анода. Проходя через почвенный раствор как через электролит, этот ток поддерживает в плодородном слое процессы электрофореза и электролиза, благо-

даря чему необходимые растениям химические вещества почвы переходят из трудноусвояемых в легкоусвояемые формы. Кроме того, под воздействием электрического тока все растительные остатки, семена сорняков, отмершие животные организмы быстрее гумифицируются, что ведет к росту плодородия почвы.

Как видим, в данном варианте электризация почвы возникает без искусственного источника энергии, лишь в результате действия электромагнитных сил нашей планеты. Между тем, за счет этой «даровой» энергии в экспериментах получена весьма высокая прибавка урожая зерна — до 7 ц/га. Это еще одно свидетельство того, что в сельском хозяйстве следует полнее использовать естественные электромагнитные силы природы.

Электрогрядки в космосе

Занятия с зелеными растениями доставляют нам массу наслаждений: в безжизненном космосе — зелень, жизнь.

В. Севастьянов
(летчик-космонавт)

Современному человеку все чаще и чаще приходится трудиться в окружении металла и пластика, многочисленных табло и мигающих огоньков приборов. После такой работы особенно приятно соприкоснуться с природой: побыть под сенью берез, вдохнуть аромат роз, насладиться красотой луговых трав. Без этого человек чувствует себя угнетенно, теряет работоспособность. Удивительным свойством взбодрить, поднять настроение обладает сорванная с гряд ягода земляники, огурец или помидор. Да и просто взгляд на растения, кажется, вливает в нас новые силы.

И это не просто эмоции. Установлено, что запахи множества растений благоприятно влияют на физиологическое состояние людей. И не только ароматы. Каждый, должно быть, замечал, что в лесу утомляешься меньше, чем даже в хорошо проветриваемом помещении. Этому тоже есть научное объяснение. Летучие вещества растений вызывают появление в воздухе полезных для нашего здоровья легких отрицательных ионов и снижают содержание вредных нам положительно заряженных тяжелых ионов. Ну а о гигиеническом значении фитонцидов, подавляющих болезнетворные микроорганизмы, об очистке растениями атмосферы

ры от дыма, пыли и других физических, химических и биологических загрязнений известно хорошо. И еще одно обстоятельство. Работа в саду — один из лучших видов отдыха и психологической разрядки.

Всего этого пока лишены космонавты, которые долгие месяцы вдали от земли выполняют ни с чем не сравнимую по напряжению и эмоциональным нагрузкам работу. Вот почему они с большим удовольствием и заинтересованностью помогают биологам отрабатывать технологию выращивания растений в невесомости. Это одно из самых любимых занятий космонавтов. Все, кто побывал на околоземной орбите, в один голос говорят, что забота о растениях — и отдых, и радость.

Между тем в длительных космических полетах требуется не только научиться вырастить растение, получить плоды, но и создать замкнутые экологические системы, подобные земным. Такие системы из автотрофных и гетеротрофных организмов, потребляя извне только энергию, могут длительное время обеспечивать космонавтов полноценным питанием, включая белки, углеводы, минеральные вещества и витамины, генерировать кислород и поглощать углекислый газ, утилизировать отходы жизнедеятельности человека. Основным звеном экологической системы должны быть зеленые растения. Лишь они, используя энергию света и отходы человеческого организма, могут синтезировать практически все необходимые для его существования органические соединения.

Более 100 лет назад наш великий соотечественник, «отец космонавтики» К. Э. Циолковский (1857—1935), начав исследования, посвященные освоению космоса, большое внимание уделял живой природе. Об этом можно судить по замечательному высказыванию талантливого ученого: «Мы рассмотрели космос с механической точки зрения. Он бы не имел никакого смысла, если бы не дал биологической жизни»⁷. Циолковский впервые предложил создать в космической ракете замкнутую систему кругооборота всех необходимых для жизни веществ. Он считал, что на корабле в миниатюре должны быть воспроизведены все основные процессы превращения веществ, которые совершаются на нашей планете. С этой целью он предложил создавать искусственную атмосферу, занимая определенную площадь под оранжереи.

⁷ Цит. по: Газенко О., Малкин В. Идеи Циолковского в космической биологии // Наука и жизнь. 1982. № 11. С. 60.

Создание оранжереи Циолковский обосновывал тем, что в межпланетных полетах жизнь в герметичных кабинках космических кораблей не может быть обеспечена взятиями с Земли запасами кислорода, пищи, воды и химических поглотителей углекислого газа, так как их потребуется очень большое количество. В этом легко убедиться, если учесть, что одному человеку в день необходимо 600—700 г обезвоженных продуктов и более 2 л воды. Следовательно, для полета длительностью в один год экипажу из трех человек потребуется около 3 т воды и пищи.

То, что теоретически разрабатывал К. Э. Циолковский, на практике осуществил С. П. Королев (1906/1907—1966). Еще в 1962 г. он говорил о необходимости начинать работу над получением космического урожая, определить организации, которые будут вести работы по линии растениеводства, механизации и светотеплосолнечной технике, т. е. С. П. Королев, по существу, наметил программу работ с растениями при проведении космических исследований. Ее элементы затем выполнялись практически на каждом космическом летательном аппарате в течение вот уже почти трех десятков лет.

К настоящему времени на орбитальных станциях, кораблях и искусственных биоспутниках Земли проведены многочисленные исследования с зелеными растениями. В космосе выращивались лук и орхидеи, горох и пшеница, лен и арабидопсис, даже проростки сосны. Перечень растений — космических первопроходцев — составляет десятки наименований и быстро расширяется. Биологи пытаются выяснить, как влияет невесомость и другие факторы космического полета на различные по физиологическим и морфологическим свойствам растительные организмы, что необходимо для обеспечения их полноценной жизнедеятельности. Уже накоплен немалый экспериментальный материал, достигнуты определенные успехи.

Вместе с тем проводимый на Земле анализ свидетельствует о неудовлетворительном развитии растений в космосе. «Несмотря на внешнее сходство с контрольными (наземными), — пишут современные биологи А. Л. Машинский и Г. С. Нечитайло, — растения отличались по структуре клеток, биохимическому составу, ростовым характеристикам. Это, казалось, подтверждало скепсис тех ученых, которые и до того уже сомневались в возможности нормального роста растений в условиях невесомости. Дальнейшие эксперименты по культивированию растений в длительных космических экспедициях тоже не принесли ничего утешитель-

ного. У пшеницы и гороха никак не удавалось получить не только семян, но даже цветков. На стадии их образования растения просто погибали»⁸.

Затем дела пошли лучше. И вот в 1982 г. первый важный успех, который, кстати, выпал на долю маленького, невзрачного растеньица арабидопсиса. Среди ученых его часто называют растительной «дрозофилой» за его удивительную приспособляемость к различным условиям, короткий цикл развития (всего около 30 дней) и пригодность к глубоким лабораторным исследованиям. На станции «Салют-7», где работали А. Березовой и В. Лебедев, это растение культивировали в герметической камере «Фитон-3» с пятью кюветами и собственным источником света. В кюветах находился субстрат из агара, содержащий до 98 % воды. Конструкция камеры предусматривала то, что по мере роста растений их можно было отодвигать от источника света. Семёна с помощью сеялки-пушки сеяли сами космонавты. Сначала арабидопсис рос медленно, но затем зацвел и дал плоды. Впервые растение в невесомости прошло весь цикл развития — от семени до семени. То был успех зарождающегося космического растениеводства.

Правда, арабидопсис — самоопылитель, оплодотворение у него происходит еще до раскрытия бутона. Но как быть с другими растениями — в невесомости они по-прежнему растут и развиваются не очень охотно. И ученые продолжили эксперименты, стараясь нащупать то звено в цепочке космических условий, которое мешает нормальной жизни высших растений. А мешает многое. Там, в помещениях, нет дня и ночи, не сменяют друг друга времена года, отсутствует гравитация, земные магнитное и электрическое поля.

Вот мы и вновь подошли к электричеству.

Электрическое поле в роли гравитационного

Возьмите проросток любого растения: в какое положение ни помести его, корни всегда точно определяют дорогу к центру Земли, а зеленый побег, сколько его ни поворачивай, все равно устремится к Солнцу. Стремление корней к центру Земли — это работа сил земного тяготения.

Откуда же у растений такая привязанность к гравитации, что они без нее жить не могут? Дело в том, что за

⁸ Машинский А., Нечитайло Г. Рождение космического растениеводства // Техника — молодежи. 1963. № 4. С. 2—7.

длительную историю в условиях земной жизни у них образовался своеобразный вестибулярный аппарат. Его работа выглядит примерно так: относительно тяжелые крахмальные зерна — статолиты, — плавающие в клетках, под действием силы тяжести собираются с той или иной их стороны и раздражают цитоплазму клетки. К гнущейся части стебля направляются тут же гормоны роста и вызывают там активный рост тканей, выпрямляя изгиб. Таким образом, растение ориентирует свой рост в пространстве. В корне крахмальные зерна находятся «на дне» клеток корневого чехлика — на самом кончике корешка, в растущей его части.

С этим связаны многие физиологические процессы. Установлено, кстати, что растению не столь важно происхождение сил тяготения. Еще в прошлом веке ботаники выращивали различные культуры в центрифугах. Ростки вытягивались точно по стрелке вектора, суммирующего действие сил земного тяготения и центробежной. Способность органов растений принимать определенное положение под влиянием земного притяжения получила название геотропизм (*гео* — земля, *тропос* — поворот, направление).

Что же происходит, когда тяжесть отсутствует? Тогда в клетках корневого чехлика статолиты «разбредаются» по всему их объему и корешки «теряются», не знают, в какую сторону им расти. Стебельки также хаотично тянутся в разные стороны, не находя нужного направления. Поэтому космонавты и наблюдают удивительную картину: из вегетационного сосуда в разные стороны тянутся сразу и стебельки и корешки.

То же самое можно увидеть не только в космических кораблях, но и на Земле при выращивании растений на установке, называемой клиноостатом. В ней не создается невесомость как таковая, но образуется подобный эффект. На клиноостате растение непрерывно поворачивается по отношению к направлению силы тяжести, в результате чего гравитационное раздражение не успевает вызвать ответную реакцию организма и оно гибнет или, по крайней мере, не плодоносит.

В невесомости тысячелетиями отработанные взаимодействия растений с гравитационным и электромагнитным полями нарушаются. Возможно, в этом кроются причины многих неудач с выращиванием высших растений на космических кораблях? Очевидно, там прежде всего нарушается координация физиолого-биохимических процессов, регулируемых в обычных условиях биоэлектростенностями.

Отсутствие сил тяготения и электрического поля в невесомости должно определенным образом сказаться на одном важнейшем свойстве живых организмов — полярности. Наглядно она выражается в том, что корни растут в одну сторону, а стебли — в противоположную. Полярность имеет важное значение для живых систем, является первой и основной чертой строения организмов.

В комплексе факторов внешней среды решающая роль в полярности принадлежит силе тяжести. Она ориентирует компоненты клеток в пространстве, определяет размещение последовательно возникающих структурных элементов организма и полярность организма в целом. Профессор Черновицкого университета Г. Х. Молотковский выращивал судзу, черный паслен, кенаф, табак, кукурузу, подсолнечник, черемуху и другие растения в обратном положении по отношению к действию силы тяжести. Это приводило к резким изменениям в их форме и развитии. «Прежде всего, — пишет автор, — наблюдалась задержка в наступлении цветения, иногда до года и больше, например, у кенафа; ускорялся выход растения из состояния покоя; происходило расшатывание наследственной природы растений, повышение их пластичности и т. д. Повторное воспитание растений в течение двух-трех поколений в перевернутом положении приводило к изменению природы растений кукурузы, судзы, подсолнечника и других»⁹.

Нельзя не отметить: что-то подобное было зарегистрировано при выращивании растений на биоспутниках и орбитальных станциях. Семена салата, например, всходили на 3 дня раньше, чем в контрольных опытах на Земле, в ряде случаев имела место абберация хромосом, и, наконец, ни одно растение, кроме арабидопсиса, не удавалось довести до цветения.

Вместе с тем сила тяжести хотя и определяющий, но не единственный фактор поляризации. На нее влияют свет, электромагнитное поле, влага, элементы питания и т. д. Ведущая роль в образовании внутренней, коррелятивной поляризации клеток и тканей принадлежит фитогормонам. Известен широко вошедший в учебники по физиологии растений пример, показывающий, что во влажной атмосфере черенок винограда, подвешенный в перевернутом состоянии, прорастает, образуя корни вверху, в так называемой базальной части, и распуская почки внизу, в апикальной части. Это связано с тем, что гетероауксин и его фи-

⁹ Молотковский Г. Х. Полярность развития растений. Львов, 1961. С. 12—14.

физиологические аналоги — β -индолилмасляная кислота, α -нафтилуксусная кислота и др. — усиливают нисходящий ток веществ к основаниям черенков, а гиббериловая кислота и иные фитогормоны, наоборот, способствуют восходящему току веществ. Свообразными факторами поляризации являются и витамины. С помощью физиологически активных веществ даже удастся преодолеть врожденную полярность.

Полярность лежит в основе становления, развития и существования растения как целостного организма. С этим явлением тесно связаны процессы обмена веществ, питания, роста и развития растения. С изменением полярности усиливается или ослабляется поступление влаги и питательных веществ в стебли и листья, отток из последних ассимилятов, а следовательно, изменяется состояние всего организма, нарушается координация физиологических процессов в растении.

В этой связи нельзя не вспомнить удивительные и совершенно неожиданные по тем временам выводы К. Э. Циолковского. В результате глубоких размышлений он пришел к заключению, что в основе жизни лежат процессы обмена веществ, которые осуществляются благодаря непрерывному поступлению в организм необходимых для жизни химических соединений из внешней среды. Ученый полагал, что если транспортировка этих веществ к клеткам не будет существенно нарушена в условиях невесомости, то жизнь там сохранится. Из этого следует еще один фундаментальный вывод: непосредственно на клетку невесомость решающего влияния оказывать не должна.

Поражает то, как мог человек, не имеющий даже гимназического образования, предвидеть то, что сейчас понятно не всем ученым в этой области. Великолепно сказал о Циолковском академик О. Г. Газенко, что он «далеко опередил не только своих современников, но и нас, уже вступивших в космический век».

Действительно, сейчас рядом исследований показано, что невесомость не оказывает губительного воздействия на клетку. Этот вывод можно проиллюстрировать, в частности, результатами уникальных опытов с изолированными клетками моркови. Большинство из тех, которые в течение 20 дней находились на биоспутнике, развили жизнеспособные и во всех отношениях нормальные эмбрионы, словно дело происходило на нашей планете. Затем из этих эмбрионов на Земле выросли совершенно нормальные растения. Однако целому растению без тяжести расти почему-то

очень трудно. Чем же помочь ему преодолеть отсутствие гравитации?

Вполне логично ответить — надо создать искусственное гравитационное поле. Может быть, в будущем и пойдут по этому пути, однако это трудно осуществимо. Нужны громоздкие устройства и главная энергия, а энергооборуженность космических кораблей пока не превышает нескольких киловатт в расчете на одного человека.

А если призвать на помощь электричество? Ведь сила у него огромная, в миллион миллиардов миллиардов миллиардов раз сильнее, чем сила тяготения...

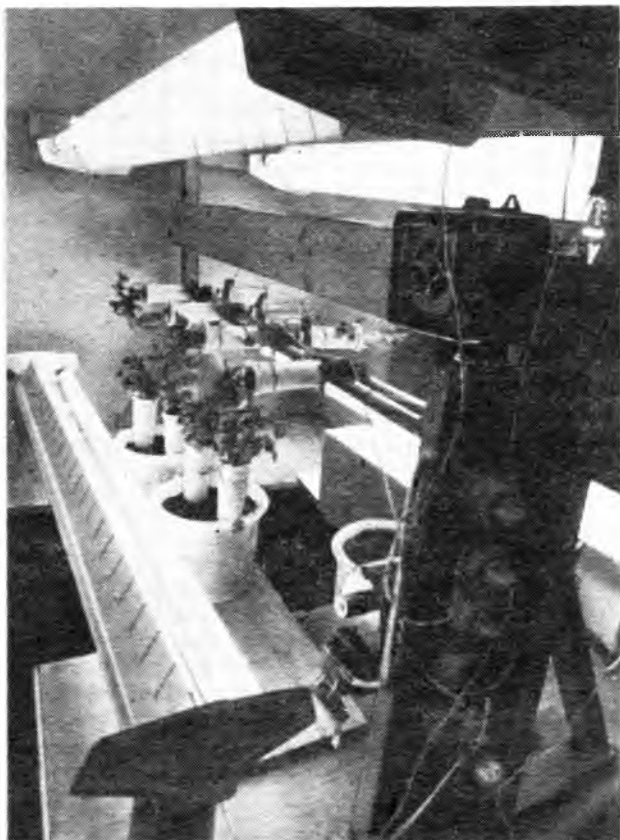
Эксперимент «Электрод потенциал»

Надо полагать, что приложением внешнего электрического потенциала можно регулировать градиенты полярности растений в условиях космических полетов, где она, очевидно, не проявляется или проявляется в слабой степени из-за отсутствия гравитации и электромагнитного поля. Это предположение было проверено в Смоленском филиале ТСХА в экспериментах на клиностатах (рис. 4).

В качестве электродов для подачи напряжения от гальванического элемента использовали токопроводящую углеродную ткань, инертную в химическом отношении. Разность потенциалов задавали от 100 до 600 мВ, т. е. удерживали ее в пределах естественных электрических потенциалов растений и почвы. Отрицательный полюс находится на дне сосуда, положительный — на поверхности субстрата или на верхушке растений.

И вот первый опыт. Два полиэтиленовых стаканчика с высаженным в них луком раз в 2 с автоматически меняли расположение — от нормального (пером вверх) до прямо противоположного (пером вниз). Таким образом, растения были поставлены в условия, в которых они не успевали приспособиться к изменению в направлении сил тяготения. Естественно, они не могли сообразовать с постоянными переменами и свои биологические процессы: ведь электроимпульсы возникают даже при изгибе растения на 15° , а тут все 180° , да еще так часто — биопотенциалы должны были метаться непрерывно отовсюду. Затруднялось также движение ионов, а следовательно, и питание, водоснабжение лука и пр.

Луковицы поместили в клиностат, когда они имели ростки немногим более 2 см. Через одно из подопытных



Р и с. 4. Одна из разновидностей клиностата
Внизу контрольные растения гороха не вращаются

растений в определенном направлении пропускали постоянный электрический ток от обычной батарейки для карманного фонарика, уменьшенный потенциометром до уровня, немногим превышающего пороговый биоэлектрический потенциал. Второе оставалось без напряжения (контрольное). В остальном условия их выращивания были абсолютно одинаковыми: они вращались на одной оси, причем через равные промежутки времени. В течение всего эксперимента почва имела оптимальную влажность, ее удобряли раствором нитрофоски.

Уже к концу первых суток работы клиностата росток контрольного лука начал изгибаться, а на четвертые сутки

его перья разошлись в разные стороны и их кончики загнулись. Лук, подверженный электростимуляции, продолжал расти как ни в чем не бывало — прямо, перья его не расходились. В контрольном растении заметно ослабевал напор клеточного сока, что является следствием нарушения ассимиляции, движения веществ, испарения влаги. На шестые сутки на его перьях начали появляться перетяжки, их кончики увяли. Это свидетельствовало о близкой гибели растения. Тот же лук, который находился под напряжением, оставался прямым, имел хороший напор клеточного сока, окраска его перьев стала явно темнее, чем у контрольного, кончики их не изгибались и не увядали.

Чтобы окончательно убедиться в благоприятном влиянии электрического тока на рост лука в экстремальных условиях, на шестые сутки напряжение было подано на контрольное растение, а с первого снято. И картина резко изменилась. Увядавший лук начал наполняться клеточным соком, выпрямляться, усохшие кончики перьев отвалились. Не прошло и недели после подачи потенциала, как недавно гибнувшее растение приобрело нормальный вид. При этом с заметным опережением росли перья, непосредственно находившиеся под напряжением. А ранее процветавшее растение? Лишенное внешнего потенциала, оно разветвилось, кончики его перьев загнулись, давление клеточного сока начало падать. На двадцатые сутки оно, по существу, прекратило рост в отличие от растения, стимулируемого электричеством, на котором продолжали появляться и интенсивно расти новые перья.

Еще более интересные результаты получены в опытах с тем же невзрачным арабидопсисом при электровоздействии на его корнеобитаемый слой. В электрососудах несколько раньше, чем в контрольных, появились всходы, проростки были четко сориентированы перпендикулярно поверхности субстрата, по внешнему виду не отличались от выращиваемых в обычных условиях (без клиностатирования). Всходы нестимулированных растений имели тонкие и большей частью изогнутые стебельки, их мелкие и светлые листья отличались слабым тургором. Эти арабидопсисы погибали на 18—23-й день в фазе незавершенной розетки.

При электровоздействии у растений на 8 дней раньше, чем в стационарном контроле, сформировалась розетка, с опережением прошли другие фазы развития. Размер стручков, количество и вес семян практически не отличались от тех, которые были у растений, выращенных в нормальных условиях, а высота и количество биомассы были даже

больше. Полученные семена обладали хорошей всхожестью. В вариантах, где напряжение подавалось и на корнеобитаемую зону, и на стебель, растения отставали в росте, давали невсхожие семена.

Аналогичные результаты получены и на некоторых других культурах. В частности, при электростимуляции образовались ягоды садовой земляники, помещенной в клиностате в фазе бутонизации. При отсутствии внешнего электрического тока этого не происходило. Намного лучше при электростимуляции в отличие от контрольных развивались и образовали корнеплоды редис и морковь (рис. 5).

В опытах с горохом при клиностатировании электростимуляция также обеспечила повышенную всхожесть семян и направленную ориентацию побегов, полноценное развитие растений. Вес надземной и корневой массы, площадь листьев у них были даже большими, чем у растений, выращенных при обычной гравитации (при равных других условиях). Растения гороха, клиностатированные без электростимуляции, погибали на 36—42-й день после всходов.

Конечно, имитируемая при помощи клиностата невесомость не может воссоздать истинной невесомости, существующей при космических полетах. Пока к сожалению, невозможно на Земле искусственно воспроизвести все те факторы среды обитания, которые действуют в космосе. Тем не менее полученные на клиностатах результаты послужили надежным основанием для изучения влияния электростимуляции высших растений непосредственно в невесомости.

Исследования возможности применения слабого электрического тока для улучшения роста растений в невесомости были проведены совместно с ВНИИ биотехники на станции «Салют-6» в устройстве «Элеktропотенциал». Оно включало автономный блок электропитания и два вегетационных сосуда, установленные в культивационный блок системы «Оазис-1А». На дне сосудов и на поверхности субстрата были расположены электроды в виде перфорированных полос из углеродной ткани. Электроды подключали к блоку питания, снабженному индикаторами протекания тока по субстрату. После появления всходов напряжение подавали также и на верхушки растений.

Полученные в ходе эксперимента результаты подтвердили предположение о том, что неблагоприятные для рас-

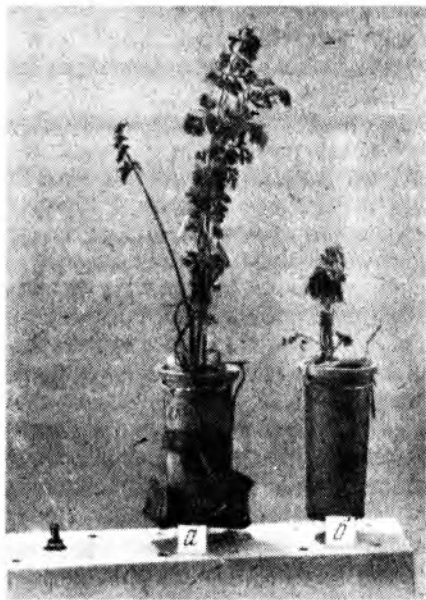


Рис. 5. Растения моркови, выращенные в клиноштате

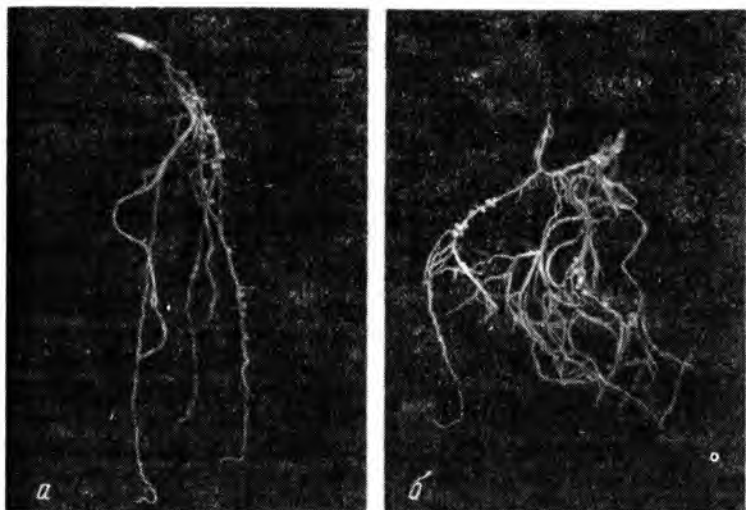
a — с электростимуляцией;
б — контроль.

тений условия космического полета можно в какой-то мере компенсировать, создавая искусственную разность потенциалов, близкую по величине к естественным электрическим градиентам растений и почвы.

Следующий эксперимент с более совершенными вегетационными сосудами, где электродействие осуществлялось только на корнеобитаемую зону, был поставлен на станции

«Салют-7». Одновременно в виде контроля с точно такими же сосудами, освещением, влажностью и т. д. проводили в лабораторных условиях на клиноштате. Результаты получены более обнадеживающие. При наличии слабого постоянного электрического поля в корнеобитаемой зоне значительно возросло количество всхожих семян, нормализовалась ориентация корня в сторону субстрата, ускорились развитие и рост растений (рис. 6). Например, в 25-дневном эксперименте в летных условиях высота гороха и пшеницы, площадь их листьев при электростимуляции были больше контрольных на 28—30 %. Примерно такой же была прибавка вегетативной массы на клиноштатах, но при гораздо лучшем развитии по сравнению с летными контрольных растений. Для сравнения: в стационарных условиях в лаборатории прирост высоты и листовой поверхности тех же культур не превышал 5 %.

Известно, что о благополучии в росте растений можно с большей вероятностью судить по содержанию основных элементов питания в надземной и корневой частях растений. Весьма интересные данные в этом отношении получены при электростимуляции растений, выращиваемых на орбитальных станциях и на клиноштатах. Анализ показал: летные образцы значительно отличаются от наземных по



Р и с. 6. Корневая система гороха, выращенного в клиностате
а — контроль; *б* — с электростимуляцией

химическому составу. В них намного меньше, чем в контрольных, азота, а калия больше: в стеблях — в 4,7, в корнях — в 6 раз. При клиностатировании содержание тех же элементов было примерно таким же, как и при выращивании растений в стационаре, в то время как азота содержалось больше и в стеблях, и в корне.

Электростимуляция благотворно сказывается на распределении элементов питания в органах растений, особенно в летных условиях. Под ее влиянием в надземной части увеличивалось содержание элементов питания, в первую очередь калия и фосфора. В корнях наблюдалась обратная закономерность — содержание азота, фосфора и калия было намного ниже, чем в контроле. Это свидетельствует о том, что в невесомости затруднен транспорт ионов из корней в стебли и листья и что его можно активизировать приложением внешнего электропотенциала.

Значительное влияние электровоздействие оказывает и на некоторые биохимические процессы растений, выращиваемых в экстремальных условиях. Об этом красноречиво свидетельствуют результаты анализов, выполненных в Центральном республиканском ботаническом саду АН УССР. Так, в ионитной почве, на которой выращивали горох в клиностате, в составе аминокислот были обнаружены аспарагин, аспарагиновая кислота, глицин, глутаминовая

кислота, гистидин, лизин и пролин. Усиливаются выделительные функции корней при наложении на корнеобитаемую зону слабого электрического поля. При этом в субстрате, кроме указанных выше аминокислот, накапливаются глутамин, лейцин, орнитин, треонин и фенилаланин. Подобная закономерность проявилась также при выращивании огурцов, арабидопсиса, садовой земляники. Если сравнить эти данные с результатами других исследований, свидетельствующих о нарушении механизма отвода продуктов жизнедеятельности растений в невесомости, то станет ясным, что и в этом случае электричество срабатывает.

Аналогично действует оно и на соотношение стимуляторов и ингибиторов роста в субстрате, на котором возделывали горох, арабидопсис, огурцы и некоторые другие культуры. При этом положительное влияние внешнего электрического поля на соотношение этих физиологически активных веществ при возделывании гороха наиболее ярко проявилось в фазе цветения. Если при клиностаировании содержание роста активирующих гормонов сильно снижалось, а ингибиторов увеличивалось, то электростимуляция приводила их соотношение к параметрам, характерным для нормально развитых растений в стационарных условиях.

Электростимуляция значительно увеличивает содержание хлорофилла и каротина у растений, выращиваемых при отсутствии гравитостимула, оказывает заметный эффект на клеточном уровне. В световом микроскопе хорошо видно, что в летных образцах гороха, которые не испытывали благотворного воздействия электричества, более тонкие и извилистые клеточные стенки, местами наблюдается даже их разрыв, значительное место занимают межклеточные пространства. Клетки тканей электростимулированного гороха имеют уже близкую к норме форму клеток, более утолщенные и выровненные стенки. В тканях гороха хорошо просматриваются плазмодесмы, что свидетельствует о лучшем контакте между собой.

Конечно, те данные, которые получены при изучении эффективности электростимуляции в обусловленных невесомостью экстремальных условиях, более чем скромные. Но они дают основание еще раз убедиться в важности электричества для растений и возможности использовать его на благо человечества. Они также служат новым импульсом для углубленного исследования электрических явлений в самом растении и путей их регулирования внешними электромагнитными полями.

Когда сообщения об экспериментах с электростимуляцией на орбитальных станциях появились в газете «Правда» (7 декабря 1980 г.), в редакцию сразу же пришло восторженное письмо одного из первых электрофизиологов, заслуженного деятеля наук РСФСР, доктора биологических наук З. И. Журбицкого. Он писал, что «в обычных земных условиях ученые до сих пор не заметили влияния очень важного фактора жизни растений, определяющего интенсивность фотосинтеза и поглощение элементов минерального питания растений,— электрических потенциалов. Их влияние не замечают также, как не учитывалось раньше влияние всегда существующей гравитации, хотя ее роль очень существенна...».

Однако еще раз зададим вопрос: может быть электричество растениям в невесомости не нужно? Тем более что уже проверено: в космическом пространстве изолированные клетки растений и микроорганизмы хорошо развиваются без создания искусственного гравитационного или электрического поля.

Действительно ли они необходимы высшим растениям? Да, им без них в космосе не жить. А микроорганизмам? Мельчайшие организмы «вступают» в поле, где главную роль играют молекулярные силы, поэтому их жизнь и связанные с нею явления определяются не только всемирным тяготением. Простейший одноклеточный организм — бактерия имеет слабо поляризованную клетку, в которой практически не различается верх и низ, нет рецептора гравитации и размеры ее так малы, что гравитационные силы не оказывают на нее и ее структуры какого-либо прямого влияния. И, несмотря на все это, в электрическом поле и микроорганизмы развиваются лучше.

У более высоко организованных организмов выше зависимость, «привычка» именно к гравитационному полю. У них явно выражена поляризация, которая, помимо того, связана с электромагнитным полем Земли. Так что растения в невесомости вряд ли смогут обойтись без факторов, обеспечивающих их функционирование. И наиболее приемлема в этом случае помощь электричеством. Оно в силах компенсировать отсутствие в космосе гравитационного поля.

Некоторые аспекты будущего

Не знаю, каким я могу казаться миру, но самому себе я представляюсь ребенком, который играет на берегу и развлекается тем, что иногда отыскивает красивую раковину или камешек, более яркий, чем обычно, в то время как великий океан истины неисследованной расстилается передо мной.

И. Ньютон.

Электроселекция в пробирке

В свое время президент Лондонского королевского общества крупный английский физик П. М. С. Блэкетт (1897—1974) говорил, что молекулярная биология в такой же мере революционизировала науку о живом мире, как квантовая теория революционизировала ядерную физику. С этим нельзя не согласиться. Открытие в 1953 г. моделей вторичной структуры дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) — так называемой двойной спирали — по своему значению сопоставимо с открытием планетарной модели атома. Спустя двадцать лет удалось разработать методику рекомбинации вне организма — сшивки молекул ДНК, позволяющую конструировать организмы с новыми, неизвестными природе сочетаниями потомственных признаков, т. е. фактически искусственно создавать новые организмы. Так было положено начало генной инженерии — направленному конструированию генетических систем, которая затем разделилась на несколько перспективных направлений. Нас интересует сейчас одно из них — клеточная инженерия.

Растения обладают чудесным свойством: одна клетка в определенных условиях может развиваться до такой степени, что начинает давать биомассу и приносить потомство. Любопытное существо — эта свободно живущая клетка. Став индивидуумом, оторвавшись от «коллектива», она тем не менее помнит свое происхождение, хранит всю генетическую информацию о своем роде, виде, органе и ткани, откуда была взята. Однако, получив самостоятельность, клетка теряет свою «специальность» и превращается в каллусную (в переводе с латинского — мозоль), т. е. в ткань, затягивающую всякую рану на растении (каждому, вероятно, знакомы эти мозолистые наросты на деревьях и кустах).

Объясняется это вот чем. В ходе обычного развития растений из зародыша клетки дифференцируются по «специальностям» — становятся клетками корня, стебля, листа.

Выведенные из организма, они теряют структуру, предназначенную для выполнения определенных функций, превращаются в «безликую» каллусную массу. Этот процесс весьма сложен и, как полагают ученые, зависит от изменения активности различных генов. Одни из них, «дремавшие» до поры, начинают работать, другие, наоборот, уходят «в отставку». Как следствие, в клетке меняется соотношение ферментных и структурных белков, иным становится и характер обмена веществ.

В то же время, попав в соответствующие условия, каллусная клетка может вновь обрести свою «специальность», т. е. снова стать клеткой того органа, откуда раньше ее изъяли. Более того, свободная клетка, в отличие от заключенной в организме, в силах овладеть и новой «специальностью». Например, та, которая когда-то была «прописана» в корне, приобретает способность трудиться в листе, стебле, цветке, а то и превратиться в зародыш и дать начало целому нормальному растению. Уникальное это свойство присуще только клеткам растений.

Еще одно важное обстоятельство: свободно живущая клетка способна скрещиваться. И сделать это можно в пробирке, поместив туда семяпочку и нанеся прямо на нее пыльцу. При этом появляется возможность одолеть природные физиологические барьеры, мешающие гибридизации. У многих видов, как известно, самоопыление не происходит, а оно необходимо для выделения чистых линий. С другой стороны, не прорастает в семяпочку и пыльца отдельных видов, поэтому межвидовые скрещивания часто не удаются. Скрещивание половых клеток в пробирке позволяет обойти данные запреты природы. На этой основе селекционеры вывели уже не один сорт культурных растений.

Мало того. Стоит неполовую клетку освободить из тента организма, и она может научиться столь вроде бы противоестественному для нее занятию, как вступать в скрещивание. Правда, делать это в своем обычном обличье она не умеет. Прежде необходимо ее «раздеть». Иначе говоря, с помощью специальных ферментов освободить от пектоцеллюлозной оболочки. После чего клетка превращается в изолированный протопласт. Через некоторое время он восстановит свою «одежду» и клетка опять станет нормальной. Но пока это не произошло, перед исследователями открываются поистине неограниченные возможности: ведь «голые» протопласты могут сливаться друг с другом. При этом они пренебрегают всякими генетическими, фи-

зиологическими, иммуногенетическими барьерами, в результате чего сливаются даже растительные протопласты с животными. Так, уже сливали изолированные протопласты табака и дрозophilлы. Маленькая животная клетка попала в большую растительную и не погибала сразу, как можно было ожидать, даже пыталась делиться! На том, верно, все пока и заканчивается.

Вот здесь ученые и прибегли к помощи электричества. Поскольку «раздевать» клетки химическими средствами очень сложно, к тому же при этом понижается их жизнеспособность, решили поместить клетки в сильное электрическое поле. Тут же происходит электрический пробой клеточных мембран, в них образуются сквозные поры, и через некоторое время клетки сливаются. Причем вслед за наружными мембранами сливаются и внутриклеточные органеллы — ядра, вакуоли, митохондрии, хлоропласты и др. Получается клетка значительно больших размеров, нежели исходные.

Эксперименты показали, что при электростимуляции выход жизнеспособных гибридов увеличивается до 50—80 %. Поскольку силу электрического поля можно варьировать, то оно способно пробить любую мембрану, и потому такой прием можно считать универсальным.

Английские исследователи высказывают мысль, что электрический ток может оказаться надежным «ключом» для проникновения в очень важную проблему: как создать новые виды зерновых культур, которые в отличие от обычных противостояли бы засухе и заболеваниям. Прийти к такому предположению им помог следующий опыт. В течение одной минуты пропускали ток через клеточную культуру табака. И обнаружили, что это побудило растительные клетки дифференцироваться в 5 раз быстрее, чем в контроле. Что принципиально важно. Ибо сейчас скорость этого процесса очень затрудняет выращивание растений из клеточных культур однодольных (к ним относятся и зерновые). Развивая успех, ученые простимулировали электрическим током и клеточную культуру пшеницы. И опять достигли феноменального ускорения дифференциации клеток. Подобное увеличение скорости регенерации может сделать этот метод коммерчески выгодным, причем не только в селекции, но и для производства некоторых фармацевтических препаратов.

Для слияния протопластов, изолированных из культивируемых растительных клеток, два способа электростимуляции применил японский ученый Мицуги с сотруди-

ми. В первом случае они использовали микроэлектроды: концы двух стеклянных капилляров плотно подводили к поверхности двух соприкасающихся протопластов. Короткий электрический импульс — и протопласты сливались, образуя новую клетку с совершенно иными качествами. В другом случае применяли два параллельных платиновых электрода. Это позволяло стимулировать уже не две клетки, а множество, сколько умещалось в межэлектродном пространстве. Второй метод оказался более перспективным, так как достигалась гораздо большая жизнеспособность полученных гибридных клеток.

Или вот исследователи Института медицины западногерманского центра ядерных исследований. Они пытались живые клетки заставить сливаться, воздействуя на них электрическим полем. Поначалу у них резкие отклонения в частоте, силе или длительности импульсов вызывали полное и необратимое разрушение оболочки клеток, и они гибли. Но постепенно ученые выявили те параметры импульсов, при которых оболочки разрушались на время и после слияния клеток восстанавливались. В итоге им удалось в одну большую клетку соединить до шести обычных.

Итак, в сравнении с другими методами электростимуляции резко повышает скорость и эффект слияния клеток (буквально через минуту после включения тока две клетки овса входили в тесный контакт, а через 3 мин уже наблюдалось их полное слияние). Значительно увеличивается выход гибридных клеток, и в целом они более жизнеспособны. Словом, данный метод открывает весьма заманчивые перспективы. И не случайно многие лаборатории мира его взяли на вооружение. Ими показано, что возникшие в ходе соответствующих опытов объединения не только двух-трех, но и тысяч живых клеток остаются жизнеспособными, приобретая новые весьма интересные свойства.

Сотрудники находящегося в Йене Центрального института микробиологии и экспериментальной терапии поместили подлежащие гибридизации клетки в миниатюрную камеру с электродами, на которые подавались импульсы либо от батареи конденсаторов (1—30 кВ), либо от генератора прямоугольных импульсов напряженностью 10—200 В. Длительность импульса — 1—1000 мкс. Чтобы подготовить клетки к «сварке», сначала их склеивали либо вязкой органической жидкостью, либо воздействием переменного тока высокой частоты. В поле переменного тока клетки вы-

страиваются в цепочку, тесно соприкасаясь своим мембранами. После этого можно подавать высоковольтный импульс.

Весьма важные для практики результаты дает «электросварка» бактериальных клеток. Существуют микроорганизмы, которые хорошо размножаются в искусственных условиях. Если слить с клеткой такой бактерии клетку другого вида, не поддающегося массовому разведению на искусственных питательных средах, но обладающего каким-либо ценным качеством, то потомки будут хорошо расти в промышленной установке и вырабатывать нужные нам вещества, например антибиотики или ферменты. Дело в том, что устройство хромосомного аппарата бактерий гораздо проще, чем у высших организмов, и здесь возможна межвидовая гибридизация.

Кроме того, интерес вызывают возможности соединения клеток высших растений с бактериальными, предполагают, что таким образом удастся получить культурные растения со способностью усваивать азот из воздуха, как это делают многие микроорганизмы. Тогда отпадет необходимость в азотных удобрениях.

Огромный интерес к клеточной инженерии вполне оправдывается обнадеживающими результатами. Так, в лаборатории члена-корреспондента АН СССР Р. Г. Бутенко с помощью протопластов получили гибрид дикого и культурного картофеля и довели его до взрослого растения. Оно оказалось очень интересным. По форме листьев и куста, по размеру клубней это была промежуточная форма между тем и другим родителем, но по росту оказалось очень крупным — гетерозисным. Кроме того, оно получилось намного более устойчивым к болезням, чем его родители. Причина?

Очевидно, при слиянии клеток получают не только гибридные ядра, но и гибридная цитоплазма, тогда как при половом скрещивании отец обычно представлен в детях лишь ядром, а мать — и ядром, и цитоплазмой. Сочетание же двух цитоплазм, оказывается, имеет большое значение. В частности, у получившегося организма появились признаки, которых не было у половых гибридов тех же растений.

С помощью клеточной инженерии путем слияния протопластов получены также межвидовые гибриды моркови, табака, петунии, дурмана. Гибридная их природа доказана полностью, и это вполне нормальные растения, способные к размножению. Выведены уже и межродовые гибриды.

В их числе объединения растений из семейства крестоцветных — арабидопсиса и капусты, из семейства пасленовых — картофеля и томата. Правда, хотя в лабораториях межродовые гибриды становятся взрослыми растениями, но потомства не дают, плодов и клубней не образуют и пока представляют лишь научный интерес.

Изолированный протопласт обладает еще одним важным свойством — он вбирает в себя природные молекулы и частицы, в том числе и такие, как молекулы ДНК, вирусы, бактерии. Это позволяет вводить в клетку новую для нее генетическую информацию, изменять тем самым ее наследственную программу и в итоге получать небывалые в природе растения.

Американские исследователи использовали импульсы электрического тока для введения в кукурузу чужеродного гена и установили, что он начал функционировать. Модифицированные этим методом протопласты кукурузы выращивали над слоем особых — «кормящих» — клеток, выделенных тоже из кукурузы сорта «черный мексиканский сладкий», клетки которой быстро делятся. Последние сыграли положительную роль в эксперименте, ибо обеспечивали протопласты какими-то факторами или питательными веществами, стимулировавшими деление клеток и образование каллуса, из которого могут развиваться целые растения.

Выходит, найден новый метод, открывающий возможность получения с помощью электричества устойчивых к вредителям, гербицидам и заболеваниям злаковых культур, в частности кукурузы, риса и пшеницы.

Заглядывая в будущее, ученые предполагают: рано или поздно станет реальностью культивирование в больших масштабах растительно-животных тканей — их можно будет использовать в качестве корма для домашнего скота, поскольку они объединят в себе полезные свойства как растительной, так и животной пищи. Что значат подобные симбиозы для космонавтики? Представьте себе, в специальном биомодуле космического комплекса сидят такие существа, из которых за счет фотосинтеза космонавты получают и растительную и животную пищу. Это уже совсем близко к фантастическим зверькам К. Э. Циолковского, поселенных им на одной из планет и наделенных зелеными крылышками.

Но это очень далекая перспектива. Электричество же способно уже сейчас приносить громадную пользу практической селекции. Так, одну из самых интересных методик — отбраковку селекционного материала при направ-

ленном создании сортов на качество зерна, сопротивляемость засухе, морозостойкость, продуктивность, иммунитет к болезням — предложила группа ученых Всесоюзного селекционно-генетического института (ВСГИ) во главе академиком ВАСХНИЛ и АН УССР А. А. Созиновым. Речь идет об исследовании на уровне белковых молекул, направленном биоконструировании сорта с заранее заданными признаками и свойствами.

Разумеется, и в этом случае, как и во всех остальных, определение тех или иных наследственных данных идет с той или иной степенью точности. Ибо соответствующая информация «зашифрована» в генах, а при современном состоянии науки «прочитать» такую запись нереально. Поэтому во ВСГИ был избран путь оценки косвенных данных. Каких? Генетическая информация реализуется в синтезе тех или иных белков. Отсюда, естественно, возникла идея обнаружить, идентифицировать эти белки, чтобы через них получить сведения о гене или генах, которые их кодируют. Однако распознать белки практически невозможно: в тканях растений их содержится более 10 тыс. Вот почему исследователи выдвинули гипотезу, согласно которой у всех сортов сельскохозяйственных культур, прошедших длительный интенсивный отбор, большинство белков и, следовательно, кодирующих их генов одинаково. В то же время существуют участки хромосом, определяющие хозяйственно значимые признаки. Значит, необходимо найти белки, кодируемые именно этими участками.

Важнейшим условием успеха послужило открытие: белки наследуются «сцепленно», блоками. Эти белки постоянны, и каждый связан с изменчивостью определенного признака: высокой или низкой морозостойкостью, качеством зерна и т. д. Найти и выделить такие сцепления впервые удалось австралийским ученым К. Шефферу и К. Ригли. Развивая их работу, во ВСГИ решили составить каталог белков, встречающихся в пшенице и ячмене. Помог в этом электрофорез.

Дело в том, что любая разновидность белковых молекул имеет свой электрический заряд и отличается специфической подвижностью в электрическом поле. Выходит, если взять вещество определенного состава (крахмальный или полиакриламидный гель с добавлением в них мочевины и алюминиево-лактата) и на нем с помощью электроточка разогнать запасные белки проламины, то последние совершенно четко разделяются на группы (похоже, как «дробится» луч света, проходя через призму, на гамму цветов).

Это во-первых. А во-вторых, оказалось, что определенный электрический спектр белков свойствен вполне определенному генотипу зерновой культуры, т. е. носит ярко выраженный наследственный характер.

Благодаря такой закономерности можно отличить не только семечко пшеницы от ячменного или кукурузного, но даже рассортировать смесь зерен, допустим пшеницы, по сортам. Однако конструкторам растений нужен был абсолютно точный и главное быстро действующий метод определения потенциала гибридного потомства. Поиск его и занялись во ВСГИ.

Исследования они повели на нескольких отечественных сортах пшеницы. Соединив их в разных сочетаниях, получили около 30 тыс. несхожих между собой форм. Затем их зерна подвергали электрофорезу. И что же? Выяснилось: синтез запасных спирторастворимых белков у мягких пшениц идет под контролем шести хромосом — по две от каждого ее «прародителя» (дикой и культурной однозернянки, а также злака эгилопса). Кроме того, отдельно взятая хромосома отвечает за синтез сразу нескольких белков. Причем, как уже говорилось, все компоненты, контролируемые одной хромосомой, наследуются единым блоком. Таких блоков у конкретного сорта шесть, но собраны они во вполне определенном наборе, а потому электрофореграмма его является уникальной. Вывод?

Так как электрофореграмма — отображение генного состава данного злака, то при скрещивании в последующих поколениях происходит рекомбинация хромосом и соответствующая ей перестановка запасных белков. Поэтому селекционер, еще не приступая к гибридизации, теперь может «на кончике пера» предвидеть возможные сочетания блоков компонентов белка, т. е. вести работу не ощупью, не по наитию, а направленно, создавая формы с желаемым составом белка.

И еще достижение ученых ВСГИ. С помощью того же электрофореза они выяснили: кодируемые разными хромосомами блоки белка неоднозначно влияют на технологические свойства пшеницы. Наибольшее значение имеют те из них, синтез которых идет под контролем двух хромосом — IА и IВ. Причем одни образующиеся с их участием блоки белка способствуют улучшению хлебопекарных качеств зерна, силы муки и так далее, появление же других отрицательно влияет на те же свойства.

И последнее достоинство метода. Он обладает такой отменной чувствительностью, что для анализа достаточно

всего половинки зерна. Значит, вторую — с зародышем — селекционер может высадить в поле и получить растение с уже известными свойствами. Стоит ли говорить, насколько точнее, легче становится его работа.

Искусственная почва

В предыдущих главах мы уже рассказывали: корни поглощают азот, фосфор, калий, другие химические элементы из почвенного раствора, ионы из которого поступают в корни в обмен на выделяемые ими другие ионы. Вот та, казалось бы на первый взгляд, простейшая система, уже миллионы лет используемая растениями, с помощью электрических сил добывающих себе питание. Но, когда вникаешь глубже, вновь сталкиваешься с удивительно тонкими, невообразимо совершенными с точки зрения энергетики и используемого материала процессами.

Ионообмен идет и в самой почве. Суть его такова. Как к органическим, так и к минеральным частицам, несущим электрический заряд, притягиваются находящиеся в почвенном растворе ионы. Причем, скажем, в обмен на кальций, вытесняемый в почвенный раствор, коллоидная частица может поглотить из раствора калий или другой катион. Точно так же происходит обмен и анионами.

Благодаря этому взаимодействию ионов вода не в состоянии разорвать их электрические связи и вывести обменнопоглощенные ионы из почвы. Корневая система растений успешно справляется с такой задачей. Для чего она выделяет заряженные частицы. В результате часть ионов из почвенных коллоидов переходит в прикорневой раствор, откуда затем их усваивает растение. Ярче всего ионообменное свойство проявляется в самой активной зоне молодых корней — месте возникновения корневых волосков. Возникает вопрос, а где же корни берут ионы? Это тоже в растительном организме решено на высочайшем уровне. В ходе дыхания в корнях в качестве побочного продукта выделяется углекислый газ. Но он не пропадает даром. Из него в пленке жидкости на поверхности корневых волосков образуется угольная кислота. Последняя затем диссоциирует на два иона: H^+ и HCO_3^- . Они и используются растением для обмена на нужные им ионы соответствующего электрического заряда из почвенных запасов.

Сотрудники лаборатории термодинамики Института общей и неорганической химии АН БССР под руководством академика В. С. Солдатова поставили перед собой задачу

создать искусственную почву. Они представляли ее себе веществом, которое бы содержало все необходимые растению элементы и с которыми оно обменивалось бы ионами, так сказать, на взаимовыгодной основе. За основу своего детища белорусские ученые взяли синтетические смолы с высокой обменной емкостью. Они могут быть насыщены минеральными ионами до 10 % от общей массы, что в десятки раз превышает их содержание в хороших почвах и гидропонах.

Искусственный заменитель почвы создан на основе двух типов смол: катионита и анионита. Первый — нерастворимый в воде полимер. При набухании в воде он способен обменивать свои гидроксилы на ионы одноименного знака, или, иначе, противоионы полимера на ионы минерального питания K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и другие, имеющие положительный заряд. Анионит, наоборот, обменивает свои противоположные ионы, имеющие отрицательный заряд: SO_4^{2-} , NO_3^- , $H_2PO_4^-$ и т. п. Таким образом, перемещенные частицы катионита и анионита, насыщенные элементами минерального питания растений, представляют собой некое подобие почвы, созданное на основе электрических взаимодействий химических соединений. Из них, как из обычной почвы, растения черпают необходимое им питание.

Искусственные почвы имеют целый ряд преимуществ перед естественными. Во-первых, в них высокая концентрация минеральных ионов, что позволяет на одном субстрате выращивать несколько поколений растений без подкормок (высокие урожаи помидоров и других овощей получали в течение семи лет). Во-вторых, они просты в эксплуатации — для выращивания растений требуется только полив чистой водой. В-третьих, обладают хорошими физико-механическими свойствами: воздухопроницаемостью, влагоемкостью, механической прочностью, гранулометрическим составом. Наконец, после истощения в них минеральных компонентов очень несложно провести регенерацию, для чего субстрат определенным образом промывают и вновь насыщают необходимыми веществами. Именно поэтому, видимо, искусственные почвы находят все более широкое применение. На них селекционеры в более короткие сроки выращивают растения, размножают ценные культуры, их используют для комнатного декоративного растениеводства.

Ионитной почве пришлось выдержать и более сложные испытания в оранжерее «Земного звездолета». Так назывался эксперимент, в ходе которого группа испытателей

целый год жила в герметически замкнутом пространстве. В оранжерее росли листовая капуста, кресс-салат, огуречная трава, укроп. Нехитрые овощи не только разнообразили стол экипажа «звездолета», но и поднимали настроение людей. А ионитная почва, помимо выполнения своих прямых обязанностей, помогала очищать воздух и воду.

Тогда же родилась идея испробовать новый способ выращивания растений в космосе. Однако то, что оказалось хорошим на Земле, априори не годилось для настоящего космического корабля с его перегрузками, невесомостью, условностью понятий «верх» и «низ». Легкие ионитные гранулы разлетелись бы во все стороны в первые же минуты полета. Вот если бы вместо них было что-нибудь однородное и прочное, например ткань.

И почва превратилась в ткань. Впрочем, она может быть и нетканой, а волокнистой. Сев семян можно вести прямо во время изготовления субстрата, затем свернуть его в рулон и хранить сколько угодно. Семена будут терпеливо ждать своего часа и начнут прорастать только тогда, когда, выбрав место и время, в почву подадут воду. Так и поступили специалисты, создавая космические оранжереи «Оазис» для орбитальных станций «Салют».

Налажено уже производство искусственной почвы на Барановичском заводе бытовой химии. Однако при всех ее достоинствах она остается слишком дорогой. И ученые продолжают поиск путей совершенствования производства субстратов на основе ионитных смол, повышения их продуктивности. Этому, в свою очередь, способствует придание искусственной почве разности потенциалов, присущей естественным условиям. Для этого применяется, например, формирование разности электрохимических потенциалов, что не требует дополнительных источников тока (в естественной почве всегда разность потенциалов держится на уровне 400—600 мВ). Все это говорит о том, что, очевидно, приближается время, о котором мечтал еще М. В. Ломоносов, воскликнувший: «Как могут счастливы селяне быть оттоле, когда не будет зной, ни дождь опасен в поле».

Вода и электричество

Антуан де Сент-Экзюпери писал: «Вода, у тебя нет ни вкуса, ни запаха, тебя невозможно описать, тобой наслаждаются, не ведая, что ты такое! Нельзя сказать, что ты необходима для жизни: ты сама жизнь».

Изнуренные зноем степи и пустыни превращаются в зеленый сад, если на иссохшую землю приходит влага. Да и только ли пустыни ждут воды! Целые географические зоны, занимающие в общей сложности около 60 % поверхности Земли, страдают от отсутствия или недостатка пресной воды. Впечатляюще, например, выглядит картина засухи в фильме «Родина электричества», где рассказывается о лете «когда с неба не упало ни одной капли живой влаги, но зато во всей природе пахло тленом и прахом, будто уже была отверзта голодная могила для народа». Не случайно вблизи города Чугуева Харьковской области действует музей воды.

Действительно, вода — самое распространенное и самое важное неорганическое соединение на Земле. Она основа всех жизненных процессов, единственный источник кислорода в главном движущем процессе на Земле — фотосинтезе. Растения на 90 %, а животные на 75 % состоят из нее, и только благодаря ей в них проходят многие реакции. Потери 10—20 % воды живым организмам приводит его к гибели.

И вместе с тем вода — самое аномальное вещество в природе. Она обладает текучестью и твердостью, исключительно высокой теплоемкостью, большими значениями скрытой теплоты и испарения и т. д. У нее максимальное среди распространенных жидкостей поверхностное натяжение. Свойства воды настолько многообразны, что до сих пор нет основательной теории, которая бы их объяснила. Тем не менее достаточно ясно, что наиболее жизненно важные из них связаны с уникальностью строения ее молекулы. Угол между связями O—H в ней составляет 109° . В результате ее отрицательный заряд (кислород) и положительный (водород) собираются как бы на разных концах молекулы, образуя диполь. Причем дипольный момент у такой небольшой и простой молекулы, как H_2O , весьма велик — почти вдвое больше, чем у ближайшего химического родственника — сероводорода (H_2S) и почти в 7 раз превышает этот показатель у двуокиси азота (NO_2).

Наличие значительного дипольного момента у воды обуславливает то, что ее молекулы-магнитики сильно притягиваются друг к другу. Они могут объединяться попарно и даже в квартеты. Уже одно это наталкивает на вывод, что жидкая вода — не просто совокупность одиночных молекул, а их смесь различной степени сложности, имеющая электрозависимое строение. Но среди крупных образований-ассоциатов «гуляют» отдельные неслипшиеся молекулы.

Они очень активны в физическом, химическом и биологическом отношении. С увеличением различными методами количества таких одиночных молекул связывают активизацию воды.

Исключительной особенностью обладает и ион водорода (H^+), который образуется при диссоциации молекулы воды. Все другие химические элементы, которые в реакциях отдают электроны, делятся ими, все-таки оставляя часть себе. Например, натрий, перейдя из состояния нейтрального атома в катион (т. е. отдав электрон), остается еще с целым десятком электронов, калий — с восемнадцатью и т. д. У водорода же всего только и есть, что один электрон, и, отдав его, он остается совсем без электронной оболочки. Другими словами, то, что мы называем катионом водорода (H^+), на самом деле есть голое ядро, элементарная частица протон. И размеры его, как и других ядер, примерно в 100 000 раз меньше, чем атома. Поэтому считается, что катион водорода по сравнению с другими однозарядными катионами обладает малым размером. Это, в свою очередь, обуславливает его уникальные электрические свойства.

Если вспомнить, что в соответствии с законом физики тела, обладающие одинаковым зарядом, создают поле с напряженностью обратно пропорциональной квадрату их радиуса, то станет ясно: напряженность поля протона в громадное количество раз превышает напряженность поля, создаваемого другими катионами. Это обстоятельство и объясняет ту роль H^+ , которую он играет в уровне плодородия почв, в поведении белковых и других молекул в растительном организме и т. д.

Сильное электрическое поле протона обуславливает и так называемые водородные связи. Суть их состоит в том, что, вступив во взаимодействие с анионом кислорода O^{2-} , два иона водорода H^+ не нейтрализуют полностью свои заряды, т. е. катионы водорода еще сохраняют способность вступать в воде во взаимодействие с кислородом соседней молекулы. Именно потому молекулы в жидкой воде испытывают сильнейшее притяжение друг к другу, и вода является практически несжимаемой жидкостью. Одна молекула воды в состоянии образовать четыре водородные связи и стать основой тетраэдрического каркаса (подобно структуре льда).

Но и это еще не все, чем отличается поведение протона. Имея электростатическое поле огромной напряженности, катион H^+ сам по себе в растворе существовать не

может: к нему со всех сторон тянутся молекулы воды, образующие вокруг него плотную и толстую оболочку. Но, несмотря на это, при прохождении тока он обладает необычно высокой подвижностью. Это объясняется тем, что юркий, мельчайший по размерам протон не тянет за собой всю окружающую его «свиту» к противоположному знаку, а перепрыгивает от молекулы к молекуле воды, пока не достигнет катода. Понятно, что энергетически такой эстафетный путь гораздо выгоднее, нежели миграция через раствор громоздкого гидратированного иона.

Поэтому вода, хотя и состоит из нейтральных молекул, обладает большой электропроводностью, а при высоких давлениях и температуре ее электропроводность сопоставима с тем же показателем концентрированного солевого раствора.

И еще об одном свойстве воды — диэлектрической проницаемости, которая показывает, во сколько раз энергия взаимодействия между зарядами в жидкости меньше, чем в вакууме. У воды она наибольшая среди всех известных веществ (78 единиц, тогда как у большинства жидкостей — от 2 до 10 единиц). Выходит, два заряда в ней взаимодействуют в 78 раз слабее, чем в вакууме.

В основном именно это свойство, да высокий дипольный момент и определяют все те чудеса активированной воды, о которой сейчас очень много пишут, а также поведение ее в силовом поле. Когда на воду обрушивается электрическое или магнитное поле, слипшиеся ассоциаты дробятся, распадаются на отдельные молекулы. Число их резко увеличивается, разрушается ажурная тетраэдрическая структура и межмолекулярные водородные связи, в результате возрастает физико-химическая и биологическая активность воды.

Накоплено немало сведений о том, что омагниченная вода благотворно влияет на самые различные сельскохозяйственные культуры. Наиболее эффективно ее применение при орошении. В зерносовхозе «Кубанский» Краснодарского края был испытан поливной агрегат с магнитной обработкой воды, состоящий из шести магнитных наборов, установленных на трубопроводе, пропускающем 100 л воды в 1 с. На опытном участке заметно повысился урожай гороха, овса и сахарной свеклы.

В исследованиях болгарских ученых омагничивание оросительной воды увеличивало усвоение томатами минеральных удобрений на 70 %. Этот факт, безусловно,

заслуживает внимания. Ведь потери питательных веществ, вносимых в почву с дорогами и дефицитными туками, огромны. Так что даже небольшой рост коэффициента полезного действия питательных химикалиев — задача большой важности.

Уже налажено серийное производство магнитных аппаратов на московском чугунолитейном заводе им. Войкова. Пройдя через компактный агрегат, вода намагничивается и становится «волшебной». Урожай озимой пшеницы, томатов, огурцов, редиса, моркови, который выращен на земле, политой магнитной водой, превышает обычный в среднем на треть. Сейчас на заводе ежегодно выпускаются десятки тысяч таких аппаратов. Правда, используют их не только в сельском хозяйстве, но и в промышленности, строительстве, медицине и т. д.

Перспективно электричество и для непосредственного снабжения растений водой. Оригинальный способ орошения испытан в одном из хозяйств Австралии. На уровне корней в почве разместили сеть проводников и соединили их с отрицательным полюсом источника постоянного тока. На уровне грунтовых вод проложили второй электрод, соединенный с положительным полюсом. На электроды подавали напряжение от 2 до 12 В (в зависимости от структуры почвы и содержания в ней солей). После включения электрического тока грунтовые воды подтягивались вверх к катоду и достигали корневой системы. К тому же вода очищалась от солей (они откладываются на электродах), что важно в случае засоленных почв.

При этом способе улучшается аэрация почвы, затрудняется рост сорняков, снижается распространение грибных болезней. В районах с жарким и засушливым климатом он обеспечивает экономию поливной воды, так как она не расходуется на испарение и сток.

Не лишен способ и недостатков. Графитовое покрытие анода быстро выходит из строя (сейчас специалистами предложено более долговечное, но и более дорогое покрытие — железокремниевое). Кроме того, скапливающаяся в корневой зоне вода может перегреваться. Для предотвращения этого ныне идет работа по созданию искусственной тени для молодых растений.

В настоящее время все шире распространяются сложные системы управления условиями производства сельскохозяйственной продукции. Не только для закрытого грунта, но и для работы в поле предлагаются автоматизированные системы подачи воды, элементов питания, углекислого газа,

обеспечения другими факторами интенсификации роста и развития растений. И, как правило, все они включают элементы физического воздействия на само растение или факторы его жизнеобеспечения.

В одном из проектов, предлагаемых Всесоюзным научно-производственным объединением «Союзводоавтоматика», наряду с подачей в зону растений углекислого газа и поливной воды (в состоянии тумана), созданием центров конденсации влаги в приземном слое, регулированием питания, температуры и воздухообмена предусматривается омагничивание воды. Для осуществления чего поливную струю пропускают через создаваемое электромагнитом однородное магнитное поле с индукцией 0,1—0,25 Тл и неоднородное магнитное поле, образуемое конусообразными постоянными магнитами. Омагниченная вода, попадая на растение, оказывает на него благоприятное биологическое воздействие. Одновременно в системе предусмотрена подача электрического потенциала направленного знака на паровой конденсат. В результате складываются оптимальные условия для роста и развития растений. Урожайность сахарной свеклы в одном из опытов повысилась на 30 % по сравнению с контролем.

Однако и электроосушение, и электродиализ — лишь косвенные способы применения электричества на благо растительным организмам. Совсем недавно стало известно: электричество, подаваемое непосредственно в корнеобитаемую зону растений, способно облегчить их участь при засухе за счет пока не выясненного физиологического эффекта.

В 1983 г. в США А. Польшон и К. Верви опубликовали статью, посвященную транспорту воды у растений при стрессе. Тут же они описали опыт, когда к фасоли, подвергавшейся воздушной засухе, прикладывали градиент электрических потенциалов в 1 В/см. При этом если положительный полюс находился на растении, а отрицательный на почве, то растения завядали, причем сильнее, чем в контроле. Если полярность была обратной, завядания не наблюдалось. Кроме того, растения, находившиеся в состоянии покоя, выходили из него быстрее, если их потенциал был отрицательным, а потенциал почвы положительным. При обратной полярности растения из покоя вообще не выходили, так как погибали от обезвоживания, ведь растения фасоли находились в условиях воздушной засухи.

Примерно в те же годы в Смоленском филиале ТСХА, в лаборатории, занимавшейся вопросами эффективности

электростимуляции, обратили внимание, что при воздействии током растения лучше произрастают при дефиците влаги. Но специальные опыты тогда не были поставлены, решались другие задачи.

В 1986 г. подобный эффект электростимуляции при низкой почвенной влажности обнаружили в Московской сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева.

Здесь кукурузу, выращиваемую при недостаточном увлажнении (35 % от полной влагоемкости, что вдвое меньше оптимальной), «подпитывали» слабым электрическим током от регулируемого стабилизированного источника питания постоянного тока — промышленной батарейки в 4,5 В. При этом искусственная разность потенциалов между основанием и верхушкой подопытных растений была близка к разности биоэлектрических потенциалов тех, которые произрастают в оптимальных условиях почвенной влажности.

Опыты ставили следующим образом. До фазы пяти листьев кукурузу выращивали при оптимальной (70 %) влажности. У опытной партии затем (в отличие от контрольных) прекращали полив, доводя влажность до вдвое меньшего уровня. Одновременно и у тех, и у других растений измеряли разность биопотенциалов между основанием и верхушкой. После того как вследствие недостатка влаги было обнаружено уменьшение разности потенциалов у опытных растений, к ним присоединили электроды от батарейки: отрицательный полюс — ко второму сверху листу, положительный — к медной сетке, расположенной на дне сосуда с растениями. Часть же из этих растений составили без электростимуляции. Интересно, что у них разность биопотенциалов упала до нуля, а у тех, к которым приложили внешнее напряжение, она поднялась до уровня контрольных и составила 23—45 мВ.

Во всех вариантах растения значительно различались по внешнему виду и размерам. Наиболее развитыми были контрольные — за 35 суток эксперимента у них выросло 11 полноценных листьев, высота растений достигла в среднем 93,5 см при толщине стебля 15,7 см.

Никаких признаков недостатка влаги у них не наблюдалось. У опытных растений с электростимуляцией было 10 листьев, средняя высота составила 83 см, а толщина стебля — 13,5 см. Первые три листа подсохли, остальные были зелеными и хорошо развитыми. Хуже всех выглядели растения, выращиваемые и с дефицитом влаги, и без электростимуляции. У них насчитывалось по семь — восемь

листьев, причем пять нижних из них засохли, да и остальные были очень мелкими, недоразвитыми, высота их равнялась 73,7 см, а толщина стебля — 11,7 см. Следовательно, электростимуляция слабым постоянным током позволяет выжить растениям при остром недостатке влаги.

В несколько иной модификации благодаря другому приему создания разности электрических потенциалов в питательном субстрате (без внешнего источника тока) опыт был проведен в Смоленском филиале Московской сельскохозяйственной академии им. Тимирязева. Результат оказался поистине удивительным. Горох выращивали при оптимальном увлажнении (70 % от полной влагоемкости) и экстремальном (35 % от полной влагоемкости). Причем этот прием был гораздо эффективнее воздействия внешнего источника тока в аналогичных условиях. Что же выяснилось?

При вдвое меньшей влажности растения гороха долго не всходили и на 14-е сутки имели высоту лишь 8 см. Выглядели они весьма угнетенными. Когда же в таких экстремальных условиях растения находились под влиянием небольшой разности электрохимических потенциалов, наблюдалась совершенно иная картина. И всхожесть, и темпы роста, и общий вид их, несмотря на дефицит влаги, по существу, не отличались от контрольных, произраставших при оптимальной влажности. На 14-е сутки они имели высоту 24,6 см, что лишь на 0,5 см ниже, чем контрольные.

Естественно, напрашивается вопрос — в чем же кроется такой запас выносливости растений, какова здесь роль электричества? Ответа пока нет, есть только первые предположения. Отгадку «пристрастия» растений к электричеству помогут найти дальнейшие опыты. Но, как говорят, факт налицо, и его непременно надо использовать в практических целях. Ведь пока на орошение посевов затрачивают колоссальные количества воды и энергии для ее подачи на поля. А, оказывается, можно обойтись гораздо более экономичным способом. Нужно только найти соответствующие технические решения. Это тоже не просто, но тем не менее, думается, недалеко то время, когда электричество поможет проводить орошение сельскохозяйственных культур без полива.

Каким быть «диалогу» с растениями?

Бывают иногда тихие, спокойные, ясные дни. Листочки на деревьях замерли, даже легкая рябь не возмутит водной глади. Все окружающее застыло в строгой торжественной неподвижности. Но что при этом происходит внутри листка и стебелька?

Наука наших дней может уже многое рассказать об этом. Пока они зелены, пока на них светит солнце, жизнь в них идет полным ходом. Электроны, протоны, атомы, молекулы, комплексы молекул в едином ритме обеспечивают рост и развитие растений. Весь этот сложнейший механизм работает по программе, передающейся из поколения в поколение и заложенной в ДНК. Природа позаботилась о ее неприкосновенности, ведь речь идет о воспроизведении себе подобных. ДНК запрятана глубоко в клеточном ядре. И чтобы до нее добраться, нужно минуть не одну мембрану — этот надежный страж клетки. Преодолеть все эти преграды, как всемогущий маг, может электричество.

Это необходимо самому растению, ведь заложенная в ДНК наследственная программа реализуется с помощью электрических сигналов. Они же используются для обеспечения согласованного протекания физиологических процессов. Нарушается сигнализация — меняется синхронность в прохождении процессов жизнедеятельности организма, они выходят из-под контроля генетического аппарата клетки. В растениях наступают серьезные патологические нарушения обмена веществ, функциональной и структурной целостности клеток, тканей, органов. Разобраться в этом «языке», которым пользуется растение, познать его и использовать для целенаправленного вмешательства в важнейшие процессы — заветная мечта физиологов.

Часть сигналов, наиболее сильных, проявляющихся на поверхности тканей, исследователи научились улавливать довольно давно. Речь идет о биопотенциалах, с которыми мы вас уже знакомили. Делаются попытки расшифровать их, увязать с контролируемыми изменениями окружающей среды и физиологических процессов. Уже доказано: по некоторым параметрам растение более чувствительно, чем животное. Например, закрыла туча Солнце, и в маленьком одуванчике или многометровой сосне начинают меняться фотоэлектрические характеристики, а вслед за ними и физиологические функции.

Любая перемена в окружающей среде не ускользает от «внимания» растения. Оно реагирует на недостаток влаги и пищи, неблагоприятные почвенные и температурные условия, повреждение вирусом или насекомым-вредителем. И как важно человеку услышать еле уловимые сигналы растения о помощи, чтобы во-время помочь ему! А что такие сигналы существуют, уже ясно. Правда, адресованы они не нам, — с их помощью «переговариваются» различные части растения.

Что может дать знание электрического языка растения? Очень многое. Сейчас уже возможно в принципе создание на первый взгляд фантастической системы, когда растения в теплице сами по себе будут включать орошение, регулировать световой и тепловой режимы. Дело остается за малым — найти отличие одного сигнала от другого, что позволит точно определить, какой фактор в данный момент находится в минимуме. Основная трудность в реализации задуманного — отсутствие высокочувствительной и портативной аппаратуры.

Но ученые не ждут, когда появится идеальная аппаратура. Пользуясь доступными методами, они ищут и находят то, что необходимо для познания. Главные усилия пока направлены на выяснение электрической реакции сельскохозяйственных культур на недостаток различных элементов питания. Это чрезвычайно важная проблема: от своевременного внесения удобрений по «запросу» растений зависит, во-первых, урожай, во-вторых, норма вносимых удобрений (следовательно, уменьшится их вымывание в реки и озера, не будет наноситься ущерб природе) и, в-третьих, значительно возрастет экономическая эффективность химизации.

Кое-что о взаимосвязи уровня питания растений с их биопотенциалами уже известно. Так, Л. Зенищева и Я. Шпунар (ЧСФР) измеряли биопотенциалы у трех сортов ячменя, регулируя дозы вносимых под них азотных удобрений. И наблюдали отменную адаптационную способность на высокий уровень азотного питания сильно кустящегося короткостебельного сорта ячменя с мощной корневой системой. А вот уровень биопотенциалов был выше у длинностебельного сорта и возрастал с увеличением дозы азотных удобрений. Как известно из многолетней практики, именно длинностебельность и высокие дозы азотных удобрений являются главными причинами полегания растений. Так нет ли между этими явлениями взаимосвязи? Получается, есть. Выходит, по уровню биопотенциалов в

начальные стадии развития растений можно прогнозировать их устойчивость к полеганию и заранее принимать меры, предотвращающие его.

Другие чехословацкие ученые — Е. Шлесак и Б. Нозол — изучали влияние различных форм азотных удобрений на биоэлектрические потенциалы листьев овса при различном освещении. Выполненные ими измерения свидетельствуют: растения, выращиваемые в различных условиях питания, довольно сильно отличаются биопотенциалами. Потенциал при питании овса аммонийными формами азотных удобрений получается более отрицательный, чем при поступлении к ним нитратных форм. Причем эта разница тем существенней, чем интенсивнее освещение. Вспомните: при недостатке света в теплицах плоды больше накапливают нитраты. Значит, об интенсивности этого процесса можно судить по биопотенциалам. И что еще примечательно: с увеличением потенциала в отрицательную сторону в листьях возрастает содержание хлорофилла, т. е. по уровню биопотенциалов уже сейчас с определенной уверенностью можно судить и о том, какие формы азотных удобрений (аммиачные или нитратные) нужнее растению в данный период роста. Вот и еще один подход к снижению нитратной опасности.

Установлена также зависимость между содержанием фосфора и калия в листьях и уровнем биопотенциалов. Выходит, зримо вырисовываются реальные возможности диагностирования насыщенности растений питательными веществами в любой период их роста и развития. Это давняя мечта земледельцев.

В последние годы для определения пораженности растений грибами и вирусными заболеваниями, для оценки морозо- и жароустойчивости растений, их жизнедеятельности и урожайности широко обсуждается возможность использования данных о характере метаболических потенциалов. Думается, что реализация этой идеи долго не заставит себя ждать, электрический «язык» растений скоро будет служить надежным средством улучшения условий их выращивания.

Электростимуляция без источника тока

Не менее перспективно и другое направление. Если при различных условиях в растениях величины биоэнергетических потенциалов несхожи, то почему бы приложением близкой к оптимальным уровням внешней разности электрических потенциалов не нормализовать их рост и разви-

тие, стимулировать другие полезные для человека изменения? Вполне вероятно, что приложением внешнего тока определенных значений удастся уберечь растения и от полегания, от которого порой теряется половина, а то практически и весь урожай. Однако для реализации этого потребуется принципиально новая технология возделывания сельскохозяйственных культур. Это весьма и весьма сложное дело, ведь не навесишь же над всеми полями провода или не уложишь их сплошь да рядом в почву.

Впрочем, к такому будущему, возможно, и не придется стремиться. Ибо появятся другие, менее трудоемкие способы электростимуляции полевых культур. Да они уже и рождаются. Французские исследователи, например, запатентовали устройство, которое работает по типу электрической батареи. Только в качестве электролита используется почвенный раствор, или, другими словами, самое обыкновенное поле. Для этого в его почву поочередно помещают положительные и отрицательные электроды (в виде двух гребенок, зубья которых расположены друг между другом). Выводы от них замыкают накоротко, вызывая тем самым нагревание электролита. Между электролитами начинает проходить ток невысокой силы. Однако его вполне достаточно, как убеждают авторы, для того, чтобы стимулировать ускоренное прорастание растений и ускоренный их рост в дальнейшем.

Еще проще и доступнее метод, предложенный сотрудниками Московской сельскохозяйственной академии им. Тимирязева. Он состоит в том, что в пределах пахотного слоя располагают полосы, в одних из которых преобладают элементы минерального питания в виде анионов, в других — катионов. Создаваемая при этом разность потенциалов также стимулирует рост и развитие растений, повышает их продуктивность. Но это пока испытано в лабораторных условиях в небольших сосудах с использованием дорогостоящих химических веществ. Тем не менее, как говорят, лиха беда начало. Вполне реально представить себе внесение содержащих в большом количестве анионов или катионов минеральных удобрений в разные слои почвы, а это уже электростимуляция, это — повышенный коэффициент использования минеральных туков, это — несомненный прогресс.

Будущее электротехнологии

В конце 1985 г. в Смоленске состоялась Всесоюзная научно-техническая конференция по проблемам электрификации, автоматизации и теплоснабжения сельскохозяйственного производства. Большое место в ее работе занимали вопросы электротехнологии. Надо сказать, что электротехнология — понятие гораздо более широкое, чем электрокультура. Оно включает в себя производственное использование электрической энергии в виде электрических полей, электрического тока, а также предварительное преобразование ее в световую, тепловую, магнитную и акустическую энергию для непосредственного воздействия на сельскохозяйственные биологические объекты и продукцию, чтобы получать в них целесообразно направленные изменения. На Всесоюзной конференции отмечалось, что только в последние годы в земледелии появилось около 50 приемов электротехнологии. В ряде районов страны постоянную прописку получили электрообработка и электросепарация семян, перспективна электромелиорация, проходят испытания машины для борьбы со злейшим врагом хлопчатника вилтом, от многочисленных сорняков можно избавиться при помощи скользящих по ним электродов, наэлектризованные растворы химикатов повышают их эффективность в борьбе с болезнями и вредителями культурных растений. Одновременно в 2—3 раза уменьшается расход химических препаратов, что имеет важную экономическую значимость. Есть электрические машины для посева и уборки разных культур. Обнадеживающие результаты дают опыты с электроискровой обработкой почвы, с электрическим полем при выращивании растений в закрытом грунте, все больше профессий получают в земледелии сверхвысокие частоты (СВЧ) и ультразвук, реальным становится диагностирование состояния сельскохозяйственных культур с помощью изменения биопотенциалов. Наконец, электричество помогает растениям успешнее произрастать в экстремальных условиях.

Электричество, кроме всего прочего, является надежным средством защиты растений от нежелательных мутаций. Подтвердим это примером, где моделью для исследований служили проростки вики. Для опытов отбирали те из них, которые имели длину в несколько сантиметров и облучали их дозой в 250 Р. Причем на одни растения воздействовали электрическим током до облучения, на другие — после него. Затем проростки 22 ч держали в термостате, а уже после этого исследовали под микроскопом.

Что же в итоге получилось? После «чистого» облучения (без воздействия током) количество клеток с хромосомными нарушениями составляет 47 %, это намного больше, чем у контрольных растений (в клетках, не подвергавшихся облучению, мутации образуются только в 2 % случаев). Когда растение обрабатывали током, количество пораженных клеток было значительно меньшим. Лучшее всего защитные свойства электричества проявлялись тогда, когда корешок до облучения подносили к положительному электроду (аноду). В этом случае поражений было почти в 2 раза меньше. Считается, что защитный эффект тока связан с перераспределением ионов между различными тканями растений.

Здесь мы лишь указали сферы непосредственного применения электричества в растениеводстве, а сколько операций выполняет в земледелии электрическая энергия, преобразованная в механическую, тепловую и световую? Для их перечисления потребуется не одна страница. В то же время из научных лабораторий идут все новые и новые сведения и предложения по использованию электромагнитных эффектов для повышения урожайности сельскохозяйственных культур. И сейчас нелегко уже найти в земледельческой технологии какой-то существенный участок, где еще нельзя применять известный или недавно придуманный электромагнитный прием.

Электротехнология в сельском хозяйстве имеет большие перспективы. Во-первых, электроэнергия в будущем станет почти единственным источником энергетического обеспечения. Во-вторых, из года в год увеличивается количество новых технологий, основанных на использовании электричества как источника энергии и как специфического источника электрофизиологического воздействия на живые организмы и материалы. В-третьих, агропромышленный комплекс завершает переход на индустриальные методы получения продукции, в которых электрическая энергия — мощный резерв для ускорения и облегчения внедрения комплексной механизации и автоматизации технологических процессов, она дает ощутимые экономические и социальные эффекты, избавляет сельских тружеников от тяжелых и непрестижных видов труда.

Так за чем же остановка? Казалось бы, за малым. Если обработать при помощи электричества семена в складе — это несложно, стоит только подключиться к электросети. А вот применить электротрактор — это уже слишком серьезная проблема, ибо барабан с подающим ток кабелем бу-

дет тяжелее самого трактора. Этим и гасятся все плюсы электротехнологии в земледелии.

Но люди не устают искать подходы к электротехнологии, ведь потребность в ней в наше время неизмеримо возросла. Дело в том, что современная мобильная технология в земледелии, основанная на тракторах с тепловыми двигателями, как считают многие ученые, может еще продержаться десять, от силы двадцать лет. Причина? Непрерывно повышается масса машин, растет число проходов их по полю. А это входит в прямое противоречие с основными принципами повышения плодородия почв и обеспечения их сохранности — содержанием пахотного слоя в рыхлом состоянии, т. е. механизация работ, так необходимая для выполнения все усложняющихся приемов повышения урожайности, сама по себе становится препятствием в достижении этой цели. Круг замыкается.

Конечно, выход есть: внедрение минимальной обработки почвы, освоение интенсивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур с оставлением постоянной технологической колеи для проходов тракторов как бы по временной дороге, переход на так называемое мостовое земледелие и т. д. Но все это слишком дорого, слишком сложно и требует дополнительных затрат. А нет ли чего-нибудь попроще? Самое правильное в решении назревших проблем — найти дешевый способ подачи на поле электрической энергии.

Оригинальный способ предложен В. Ф. Смоляковым из Смоленска. Основан он на использовании аэронесущих конструкций. Выглядит все это довольно просто. В центре обрабатываемой территории расположена опора высотой, превышающей линии электропередачи, деревья, высокие элементы рельефа. Вокруг опоры концентрируется стационарное сельскохозяйственное производство, хранилища, коммуникации и т. д. В верхней части опоры устанавливается вращающийся токосъем, который подвешивается к длинному (длина равна радиусу обрабатываемых угодий) змейковому аэростату, наполненному горячим воздухом, гелием или другим газом легче воздуха. Одним концом этот аэростат крепится к опоре, другой его конец тросом закрепляется за электротрактор, обеспечивающий круговое движение системы. Под змейковым аэростатом подвешивается жесткая токопроводящая шина и троллей, от которых можно подать электрическую энергию кабелем в любую точку землепользования для питания производственных модульных электроагрегатов. Он может включать электро-

плуг или электрофрезу, электросеялку или электрокультиватор и прочие машины. Каждая из них сама себе и двигатель, и рабочий орган.

При помощи таких устройств очень удобно применять электростимуляцию, СВЧ — облучение посевов, другие физические способы повышения урожаев сельскохозяйственных культур. Кроме того, по подвешенным к аэростату полиэтиленовым трубам в нужную точку подается вода, удобрения, гербициды, инсектициды, регуляторы роста растений и т. д., т. е. создаются исключительные условия для широкого внедрения почвоохранного земледелия и интенсивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур даже в Нечерноземной зоне с типичной для нее мелкоконтурностью полей и избыточным увлажнением. При этом исключаются потери пашни и расходы жидкого топлива, значительно уменьшается металлоемкость машин и оборудования, резко повышается производительность труда. Такое устройство можно использовать также для внутрихозяйственной транспортировки различных грузов с помощью электроконтейнеров.

Ясно, что прежде чем подобные, пока еще отдающие фантастикой, проекты начнут осуществляться, пройдет немало времени. Для их реализации потребуются проведение больших научно-исследовательских работ, производство качественно новой техники, разработка принципиально новых земледельческих технологий. Но важно другое: пути к электротехнологии на полях уже имеют четкие очертания.

* * *

Таким образом, перспектива внедрения электричества в технологию возделывания сельскохозяйственных культур, его возрастающая роль в наращивании продовольственного фонда не вызывают сомнений. С высоты достижений нынешнего времени мы все полнее можем оценивать прозорливость мыслей, изложенных в плане ГОЭЛРО более 60 лет назад: «Стихия электричества как бы создана для того, чтобы вырвать труд земледельца из порабощающей его игры природы сил».

Содержание

Введение	3
«Живое» электричество	5
Как это начиналось	5
У истоков жизни	12
Жизнь невозможна без электричества	15
Воспоем электричество тела	18
«Демон» Максвелла	18
Электрохимический двигатель клетки	24
Еще две «профессии» мембраны	26
Генератор биопотенциалов	30
Листочек с корнем говорит	35
Электрический язык растений	35
Феномен чувствительности	42
Идут, идут «зеленые» часы	45
Тайна зеленого листа	46
Всемогущий фотон	46
А если нет света?	52
Биоэлектроаккумулятор	54
Земля — планета электрическая	56
Конденсатор и... динозавры	56
В океане электричества	62
В мире ионов	66
Что же под Землей?	67
Гимн Солнцу	72
Поле электрическое — полю хлебному	74
Крутые зигзаги истории	74
Электростимуляция биосистем	82
Электротропизм	93
Зачем пчеле заряд?	96
Электрообработка семян	99
Электрокультура растений	105
Электризация почвы	108

Электрорядки в космосе	115
Электрическое поле в роли гравитационного.....	118
Эксперимент «Электропотенциал»	122
Некоторые аспекты будущего.....	130
Электроселекция в пробирке	130
Искусственная почва.....	138
Вода и электричество.....	140
Каким быть «диалогу» с растениями?.....	148
Электростимуляция без источника тока.....	150
Будущее электротехнологии	152

CONTENTS

Introduction	3
«Electricity» alive	5
How it all began	5
At the sources of life	12
No life without electricity	15
Glory to the electricity of the body	18
Maxwell's «demon»	18
The electrochemical mechanism of the cell	24
Two more functions of a membrane	26
The generator of biopotentials	30
A leaf «talking» to the root	35
The electrical language of plants	35
Phenomenon of perceptibility	42
The «green clock» moving	45
Mystery of a green leaf	46
The omnipotent photon	46
And if there is no light?	52
A bioelectric battery	54
The Earth, an electrical planet	56
Condenser and... dinosaurs	56
In the ocean of electricity	62
In the world of ions	66
What is there underground?	67
A hymn to the Sun	72
An electric field to a wheat field	74
Sharp turns of history	74
Electric stimulation of biosystems	82
Electrotropism	93
A charge for the bee, why?	96
Electrical processing of seeds	99
Electricity in plant growing	105
Electrization of the soil	108
Electric beds in outer space	115
An electric field as that of gravitation	118
The «electropotential» experiment	122

Aspects of the future	130
Electrical selection in Etest-tube	130
Artificial soil.....	138
Water and electricity.....	140
A «dialogue» with plants?	148
Electrostimulation without current	150
The future of electrotechnology	152

Гордеев Анатолий Михайлович,
Шешнев Владимир Борисович

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
В ЖИЗНИ РАСТЕНИЙ**

Утверждено к печати
редколлекцией серии
«Научно-популярная литература»

Заведующая редакцией **Н. Ф. Промашкова**

Редактор издательства **Т. И. Белова**
Художник **В. В. Внгант**
Художественный редактор **И. Д. Богачев**
Технические редакторы **И. В. Чудецкая, Н. Н. Плохова**
Корректоры **Н. Б. Габасова, Т. М. Ефимова**

ИБ № 46986

Сдано в набор 10.09.90

Подписано к печати 6.03. 91

Формат 84x108 $\frac{1}{32}$

бумага кн-журнальная

Гарнитура обыкновенная новая

Печать офсетная

Усл. печ. л. 8,4. Усл. кр. отт. 8,8. Уч.-изд. л. 9,6

Тираж 1700 экз. Тип. зак. 403

Цена 3 р. 90 к.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство «Наука»
117864 ГСП-7, Москва В-485
Профсоюзная ул., 90.

4-я типография издательства «Наука»
630077 Новосибирск 77
Станиславского 25

«НАУКА»

Благодаря чему цветы каждого вида растений всегда и всюду открываются в определенное время суток? Что заставляет мимозу опускать листья, стоит прикоснуться хотя бы к одному из них? Каким образом ДНК, нить которой в длину достигает 1—2 м, в хромосоме занимает лишь около 50 мкм³? Как проще создать гибрид табака и помидора? С помощью чего удалось заставить растения, долго не желавшие нормально расти и развиваться на искусственных спутниках Земли, приспособиться к невесомости? Прочитайте эту книгу и Вы найдете ответы на эти и многие другие вопросы, касающиеся самых интимных сторон жизни зеленых друзей наших.

